

Výpočty elektrických sítí s využitím softwarových nástrojů

Calculation of electrical networks using
software tools

Bc. Patrik Maňák

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Petr Moldřík Ph.D.

Ostrava, 2020/21

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá implementací softwarového řešení do výukových úloh předmětu „Přechodné jevy elektrizační soustavy“ (PJES) a „Projektování elektrických distribučních sítí“, (PEDS). Práce se zaměřuje na tvorbu úloh a následného zpracování v podobě návodu. V první teoretické části je vysvětlen princip výpočtu ustáleného chodu komplexních sítí s využitím analytické nebo numerické metody. Dále jsou připomenuty podmínky připojitelnosti a ekonomická analýza. V druhé teoretické části, která je zaměřena na zkratky se nachází základní popis zkratů a způsob výpočtu zkratových proudů. Praktická část je zaměřena na seznámení s programem DNCalc a slouží jako průvodce výpočtem zadaných programů „Návrh sítě“ a „Zkratky v síti“.

Klíčová slova

Ustálený chod sítě, zkratky, DNCalc, síť, Newton-Raphson, souměrné složky

Abstract

The diploma thesis deals with the implementation of a software solution into the teaching tasks of the subject "Transient phenomena of the electrical system" (PJES) and "Design of electrical distribution networks" (PEDS). The work focuses on the creation of tasks and subsequent processing in the form of instructions. The first theoretical part explains the principle of calculating the steady-state operation of complex networks using analytical or numerical methods. Furthermore, the conditions of connectivity and economic analysis are reminded. The second theoretical part, which is focused on short circuits, contains a basic description of short circuits and the method of calculating short circuit currents. The practical part is focused on getting acquainted with the DNCalc program and serves as a guide to the calculation of the specified programs "Network design" and "Short circuits in the network".

Keywords

Load Flow, Short circuit, DNCalc, Network, Newton-Raphson, Symmetrical components

Poděkování

Chtěl bych věnovat speciální poděkování vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Moldříkovi Ph.D. za odbornou pomoc, pečlivost, a hlavně trpělivost při řešení dané problematiky.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	6
Seznam ilustrací.....	7
Seznam tabulek	9
Úvod	11
1 Ustálený chod sítě	12
1.1 Ustálený chod sítě jako lineární úloha.....	12
1.2 Uzlová admitanční matice	13
1.3 Ustálený chod sítě jako nelineární úloha	16
1.4 Newton-Raphsonova metoda	16
1.5 Podmínky připojitelnosti	21
1.5.1 Studie připojitelnosti	21
1.5.2 Zvýšení napětí.....	21
1.6 Ekonomické zhodnocení.....	22
1.6.1 Rozhodovací analýza	23
1.6.2 Multikriteriální analýza.....	24
2 Zkratky v síti	25
2.1 Základní pojmy	25
2.2 Druhy zkratů	25
2.3 Výpočty zkratových poměrů.....	27
2.3.1 Rozklad do souměrných slokových soustav	28
2.3.2 Metoda superpozice.....	30
2.3.3 Metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu	30
2.3.4 Výpočet dle ČSN EN 60909-0:2002.....	30
3 Výpočet ustáleného chodu sítě	31
3.1 Představení programu DNCalc	31
3.2 Popis instalace	31
3.3 Zadání	31
3.3.1 Modelování zadané úlohy v programu DNCalc	34
3.3.2 Výpočet a vypracování zadané úlohy v programu DNCalc.....	38
3.3.3 Parametry sítě	38
3.3.4 Provozní stavy a výpočet připojitelnosti	43
3.3.5 Změna jalového výkonu.....	51

3.3.6	Změna činného výkonu	57
3.3.7	Ekonomické zhodnocení.....	73
4	Výpočet zkratových poměrů v síti	78
4.1	Zadání	78
4.1.1	Popis obvodu	78
4.1.2	Modelování zadané úlohy v programu DNCalc	80
4.1.3	Výpočet a vypracování zadané úlohy v programu DNCalc.....	87
	Závěr	95
	Použitá literatura.....	96
	Seznam příloh.....	97

Seznam použitých zkratk a symbolů

Z_{ik}	[Ω]	Podélná impedance vedení mezi uzly i-k
R_{ik}	[Ω]	Odpor podélného vedení mezi uzly i-k
X_{ik}	[Ω]	Reaktance podélného vedení mezi uzly i-k
Y_{ik0}	[S]	Příčná admitance vedení mezi uzly i-k
G_{ik0}	[S]	Vodivost příčných větví mezi uzly i-k
B_{ik0}	[S]	Susceptance příčných větví mezi uzly i-k
\mathbf{A}		Uzlová admitanční matice
\mathbf{Z}		Uzlová impedanční matice
U^*	[V]	Komplexně sdružená hodnota napětí
ε	[-]	Odchylka vypočtené hodnoty od skutečné hodnoty
θ	[°]	Úhel natočení
\underline{S}	[VA]	Komplexně sdružený zdánlivý výkon
\underline{Q}	[VAr]	Jalový výkon
\underline{P}	[W]	Činný výkon
NPV		Čistá současná hodnota
IRR		Vnitřní výnosové procento
PP		Doba návratnosti
\mathbf{F}		Desymetrizační transformační matice
I_k''	[kA]	Počáteční rázový zkratový proud
$Z_{(1)}$	[Ω]	Impedance sousledné složky
u_k	[%]	Napětí nakrátko
x_d''	[%]	Subtranzientní reaktance v podélné ose
i_z	[-]	Poměr záběrného a provozního proudu
S_k	[VA]	Zkratový výkon

Seznam ilustrací

Obr. 1.5.1-1 Matematický popis uzlu i soustavy (Převzato z [2])	12
Obr. 1.5.1-1 Detail sítě pro vyjádření uzlové admitanční matice (převzato z [2])	14
Obr. 1.5.1-1 Grafické chování N-R metody [2]	18
Obr. 1.5.1-2 Diagram iteračního procesu Newton-Raphsonovy metody. [2]	20
Obr. 1.6.2-1 Schéma trojfázového zkratu [7]	25
Obr. 1.6.2-2 Schéma trojfázového zemního zkratu [7]	26
Obr. 1.6.2-3 Schéma dvoufázového zkratu [7]	26
Obr. 1.6.2-4 Schéma dvoufázového zemního zkratu [7]	26
Obr. 1.6.2-5 Schéma jednofázového zkratu [7]	26
Obr. 2.3.1-1 Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými fázory [9]	28
Obr. 3.3.1-1 DNCalc-Modelování napájecího uzlu	34
Obr. 3.3.1-2 DNCalc-Modelování transformátoru	35
Obr. 3.3.1-3 DNCalc-Modelování vedení	35
Obr. 3.3.1-4 DNCalc-Modelování zátěže	36
Obr. 3.3.1-5 DNCalc-Modelování-Výsledek	36
Obr. 3.3.1-6 DNCalc-Modelování záložního vedení	37
Obr. 3.3.1-7 DNCalc-Modelování synchronního generátoru	37
Obr. 3.3.2-1 DNCalc-Výpočet-Atributy	38
Obr. 3.3.2-2 DNCalc-Výpočet-Grafické zobrazení	39
Obr. 3.3.2-3 DNCalc-Výpočet-aktivování synchronního generátoru	41
Obr. 3.3.2-4 DNCalc-Výpočet připojitelnosti	41
Obr. 3.3.2-5 DNCalc-Výpočet-Podmínky připojitelnosti	42
Obr. 3.3.2-6 DNCalc-Výpočet-Změna výkonu synchronního generátoru	42
Obr. 3.3.2-7 DNCalc-Rozdělení úseků vedení	43
Obr. 3.3.2-8 DNCalc-Výpočet ustáleného chodu sítě s odpojeným záložním vedením a odpojeným synchronním generátorem	44
Obr. 3.3.2-9 DNCalc-Grafické znázornění výsledků a jejich export	44
Obr. 3.3.2-10 DNCalc-Zapojení záložního vedení	45
Obr. 3.3.2-11 DNCalc-Výpočet chodu sítě-Výsledky	46
Obr. 3.3.2-12 Grafická závislost $U=f(I)$ v hlavní větvi	48
Obr. 3.3.2-13 Grafická závislost $U=f(I)$ ve vedlejší větvi	48
Obr. 3.3.2-14 DNCalc-Výpočet připojitelnosti synchronního generátoru a export výsledků	49
Obr. 3.3.2-15 Změna napětí v síti po připojení synchronního generátoru o výkonu 1,6 MW	50
Obr. 3.3.2-16 DNCalc-Zadání jalového výkonu synchronního generátoru ve schématu	51
Obr. 3.3.2-17 DNCalc-Výpočet chodu sítě s dodávkou jalového výkonu do sítě synchronním generátorem	52
Obr. 3.3.2-18 Závislost $U=f(I)$ pro různé hodnoty dodávaného jalového výkonu synchronním generátorem v hlavní větvi	55
Obr. 3.3.2-19 Závislost $U=f(I)$ pro různé hodnoty dodávaného jalového výkonu synchronním generátorem ve vedlejší větvi	55
Obr. 3.3.2-20 DNCalc-Výpočet ztrát v síti	56

Obr. 3.3.2-21 Velikost celkových ztrát v síti pro různá Q zdroje	56
Obr. 3.3.2-22 DNCalc-Chybové hlášení chybně zadaného prvku	57
Obr. 3.3.2-23 DNCalc-Odpojení synchronního generátoru-Funkce "Pasivovat"	57
Obr. 3.3.2-24 DNCalc-Výpočet chodu sítě pro různá P zdroje	58
Obr. 3.3.2-25 Závislost $U=f(I)$ při různém dodávaném činném výkonu synchronního generátoru v hlavní větvi	62
Obr. 3.3.2-26 Závislost $U=f(I)$ při různém dodávaném činném výkonu synchronního generátoru ve vedlejší větvi	63
Obr. 3.3.2-27 DNCalc-Výpočet ztrát při různém dodávaném činném výkonu do sítě synchronním generátorem	64
Obr. 3.3.2-28 Velikost celkových činných ztrát při různém P zdroji	64
Obr. 3.3.2-29 DNCalc-Odpojení jednoho paprsku přívodního vedení	65
Obr. 3.3.2-30 Závislost $U=f(I)$ při odpojení napájecím vedení V1 a při různém Q synchronního generátoru	67
Obr. 3.3.2-31 DNCalc-Výpočet chodu sítě při odpojení napájecím vedení V7	69
Obr. 3.3.2-32 DNCalc-Výpočet chodu sítě při odpojení napájecím vedení V7 a při dodávce $Q = 6000$ kVar synchronním generátorem	70
Obr. 3.3.2-33 Závislost $U=f(I)$ při odpojení napájecím vedení V7 a při různém Q zdroje	71
Obr. 3.3.2-34 Ekonomické zhodnocení-Peněžní toky v jednotlivém období	75
Obr. 4.1.2-1 DNCalc-Modelování napájecího uzlu	80
Obr. 4.1.2-2 DNCalc-Modelování vedení	81
Obr. 4.1.2-3 DNCalc-Modelování přípojnice	81
Obr. 4.1.2-4 DNCalc-Dialogové okno "Vložení prvku"	82
Obr. 4.1.2-5 DNCalc-Modelování transformátoru	82
Obr. 4.1.2-6 DNCalc-Modelování synchronního generátoru	83
Obr. 4.1.2-7 DNCalc-Modelování vedení	83
Obr. 4.1.2-8 DNCalc-Modelování transformátoru	84
Obr. 4.1.2-9 DNCalc-Modelování asynchronního motoru	84
Obr. 4.1.2-10 DNCalc-Modelování sítě, parametry synchronního generátoru	85
Obr. 4.1.2-11 DNCalc-Modelování reaktoru	86
Obr. 4.1.2-12 DNCalc-Modelování zbytku vedení	86
Obr. 4.1.3-1 DNCalc-Nastavení výpočtu	87
Obr. 4.1.3-2 DNCalc-Kontrola hodnoty zkratového výkonu nadřazené soustavy	87
Obr. 4.1.3-3 DNCalc-Volba a nastavení zkratu	88
Obr. 4.1.3-4 DNCalc-Výpočet zkratových poměrů v zadaném místě pro trojfázový zkrat	89
Obr. 4.1.3-5 DNCalc-Nastavení dvoufázového zkratu	90
Obr. 4.1.3-6 DNCalc-Parametry reaktoru, výpočet zkratových poměrů	94

Seznam tabulek

Tab. 3.3.2-1 Úbytky napětí v uzlech při odpojeném záložním vedení a odpojeném synchronním generátoru.....	39
Tab. 3.3.2-2 Zatížení transformátoru při odpojeném záložním vedení a odpojeném synchronním generátoru.....	40
Tab. 3.3.2-3 Zatížení jednotlivých vedení při odpojeném záložním vedení a odpojeném synchronním generátoru.....	40
Tab. 3.3.2-4 Napěťové poměry v síti s odpojeným záložním vedením a odpojeným synchronním generátorem.....	45
Tab. 3.3.2-5 Napěťové poměry v síti s připojeným záložním vedením a odpojeným synchronním generátorem.....	46
Tab. 3.3.2-6 Napěťové poměry v síti s odpojeným záložním vedením a připojeným synchronním generátorem.....	47
Tab. 3.3.2-7 Napěťové poměry v síti s připojeným záložním vedením a připojeným synchronním generátorem.....	47
Tab. 3.3.2-8 Změna napětí v síti po připojení synchronního generátoru.....	49
Tab. 3.3.2-9 Napěťové poměry v síti při dodávce jalového výkonu 1500 kVAr synchronním generátorem	52
Tab. 3.3.2-10 Napěťové poměry v síti při dodávce jalového výkonu 800 kVAr synchronním generátorem	53
Tab. 3.3.2-11 Napěťové poměry v síti při dodávce jalového výkonu 200 kVAr synchronním generátorem	53
Tab. 3.3.2-12 Napěťové poměry v síti při $\cos\varphi=1$ synchronního generátoru	53
Tab. 3.3.2-13 Napěťové poměry v síti při odběru jalového výkonu 200 kVAr synchronním generátorem	54
Tab. 3.3.2-14 Napěťové poměry v síti při odběru jalového výkonu 800 kVAr synchronním generátorem	54
Tab. 3.3.2-15 Napěťové poměry v síti při odběru jalového výkonu 1500 kVAr synchronním generátorem	54
Tab. 3.3.2-16 Napěťové poměry v síti při odpojeném synchronním generátoru	58
Tab. 3.3.2-17 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 160 kW synchronním generátorem	59
Tab. 3.3.2-18 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 320 kW synchronním generátorem	59
Tab. 3.3.2-19 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 480 kW synchronním generátorem	59
Tab. 3.3.2-20 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 640 kW synchronním generátorem	60
Tab. 3.3.2-21 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 800 kW synchronním generátorem	60
Tab. 3.3.2-22 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 960 kW synchronním generátorem	60

Tab. 3.3.2-23 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 1120 kW synchronním generátorem	61
Tab. 3.3.2-24 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 1280 kW synchronním generátorem	61
Tab. 3.3.2-25 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 1440 kW synchronním generátorem	61
Tab. 3.3.2-26 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 1600 kW synchronním generátorem	62
Tab. 3.3.2-27 Zatížení transformátoru při odpojení přívodním vedení V1	65
Tab. 3.3.2-28 Zatížení jednotlivých vedení při odpojení přívodním vedení V1.....	66
Tab. 3.3.2-29 Napěťové poměry v síti při odpojení přívodním vedení V1	66
Tab. 3.3.2-30 Úbytky napětí v síti při dodávce jalového výkonu 1000 kVar synchronním generátorem	67
Tab. 3.3.2-31 Zatížení jednotlivých vedení při odpojení napájecím vedení V1 a při dodávce Q = 1000 kVar synchronním generátorem	68
Tab. 3.3.2-32 Zatížení transformátoru při odpojení napájecím vedení V1 a při dodávce Q = 1000 kVar synchronním generátorem	68
Tab. 3.3.2-33 Zatížení transformátoru při odpojení napájecím vedení V7	69
Tab. 3.3.2-34 Zatížení jednotlivých vedení při odpojení napájecím vedení V7	69
Tab. 3.3.2-35 Napěťové poměry v síti při odpojení napájecím vedení V7	70
Tab. 3.3.2-36 Napěťové poměry v síti při odpojení napájecím vedení V7 a při dodávce Q = 6000 kVar synchronním generátorem	71
Tab. 3.3.2-37 Zatížení jednotlivých vedení při odpojení napájecím vedení V7 a při dodávce Q = 6000 kVar synchronním generátorem	72
Tab. 3.3.2-38 Zatížení transformátoru při odpojení napájecím vedení a při dodávce Q = 6000 kVar synchronním generátorem	72
Tab. 3.3.2-39 Ekonomické zhodnocení-Specifikace materiálu	73
Tab. 3.3.2-40 Ekonomické zhodnocení-Přehled zadaných hodnot	74
Tab. 3.3.2-41 Ekonomické zhodnocení-Doba využití maxima a doba plných ztrát.....	74
Tab. 3.3.2-42 Ekonomické zhodnocení-Parametry využití při výpočtu	74
Tab. 4.1.3-1 Hodnoty napětí a proudu v místě trojfázového zkratu „a“	89
Tab. 4.1.3-2 Rozklad na souměrné složky	89
Tab. 4.1.3-3 Hodnoty napětí a proudu v místě dvoufázového zkratu „a“	90
Tab. 4.1.3-4 Rozklad na souměrné složky	90
Tab. 4.1.3-5 Hodnoty napětí a proudu v místě trojfázového zkratu "c"	91
Tab. 4.1.3-6 Rozklad na souměrné složky	91
Tab. 4.1.3-7 Hodnoty napětí a proudu v místě dvoufázového zkratu "c"	91
Tab. 4.1.3-8 Rozklad na souměrné složky	91
Tab. 4.1.3-9 Hodnoty napětí a proudu v místě trojfázového zkratu "2"	92
Tab. 4.1.3-10 Rozklad na souměrné složky	92
Tab. 4.1.3-11 Hodnoty napětí a proudu v místě trojfázového zkratu "2" se zapojeným reaktorem	94
Tab. 4.1.3-12 Rozklad na souměrné složky	94

Úvod

Poprvé byla v české republice využita elektrická energie v roce 1878 v Moravské Třebové pro osvětlení tkalcovny pomocí obloukových lamp. V té době nebylo zapotřebí přenosové soustavy, neboť místo výroby bylo shodné s místem spotřeby. V roce 1889 byla postavena první „Městská elektrárna“ v lokalitě Praha – Žižkov. Jednalo se o dynamo produkující stejnosměrnou elektrickou energii. O 11 let později, tedy v roce 1900 byl uveden do provozu první třífázový generátor v pražských Holešovicích. S výstavbou těchto „Městských elektráren“ přicházela také výstavba přenosové soustavy pro rozvod elektrické energie z místa výroby ke spotřebitelům. S tím přišla normalizace kvality elektrické energie a na to navazující výpočty ustáleného chodu sítě pro zpětnou kontrolu, zda navržená síť bude schopna dodržet dosažené standardy. Při návrhu nové sítě je výpočet ustáleného chodu a přechodných jevů zásadním a určujícím skladbu sítě z hlediska dimenzování průřezů a nastavení ochran. [1]

1 Ustálený chod sítě

1.1 Ustálený chod sítě jako lineární úloha

Cílem výpočtu je získat základní obraz soustavy v ustáleném stavu. Zejména výsledky napěťových a proudových poměrů, dodávaných a spotřebovávaných činných a jalových výkonů a ztrát. Tyto hodnoty pak lze využít dále při řešení poruchových stavů či přechodných dějů. Při řešení chodu sítě jsou uvažovány tyto předpoklady: [2]

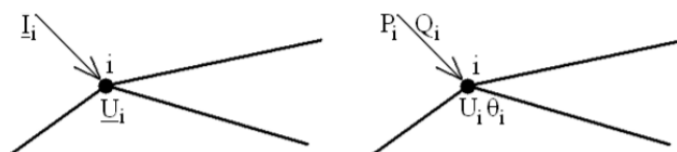
- Řešení ustáleného stavu
- Sinusový průběh proudu a napětí, tj. použití symbolicko-komplexní metody pro aktivní ($\underline{U}, \underline{I}, \underline{S}$) a pasivní ($\underline{Z}, \underline{Y}$) veličiny ve formě fázorů.
- Trojfázové sítě uvažujeme jako symetrické. Výpočet provedeme pro jednu fázi a pro zbytek dojde k natočení o $\pm 120^\circ$.
- Konstantní hodnoty síťových prvků provozovaných na jmenovité frekvenci

Nejčastěji využívané metody v praxi jsou metoda smyčkových proudů a metoda uzlových napětí. Obě tyto metody vycházejí z platnosti Ohmova zákona a Kirchhoffových formulí. Přičemž nejpoužívanější je právě metoda uzlových napětí, která nabízí řadu výhod oproti první metodě. Jako je například jednodušší příprava uzlových rovnic, snadné změny převodu u regulačních transformátorů, příčné parametry větví nečiní problém, vhodnější pro výpočty složitých a komplexních sítí a tudíž i vhodný pro použití ve výpočetní technice. [2]

Každý uzel i sítě, jež představuje odběrové místo, generátor či soustavu je pak určen tzv. aktivními veličinami. Buďto fázory proudu a sdruženého napětí ($\underline{I}_i, \underline{U}_i$), velikostí sdruženého napětí U_i , fází φ_i a nebo činným a jalovým výkonem P_i, Q_i .

$$\underline{U}_i = U_i \cdot e^{j\varphi_i} \quad \underline{U}_i^* = U_i \cdot e^{-j\varphi_i} \quad P_i = \sqrt{3} \cdot U_i \cdot I_i \cdot \cos\varphi_i \quad Q_i = \sqrt{3} \cdot U_i \cdot I_i \cdot \sin\varphi_i \quad (1-1)$$

$$S_i = P_i + jQ_i = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_i \cdot \underline{I}_i^* \rightarrow \underline{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_i^*} \quad (1-2)$$



Obr. 1.5.1-1 Matematický popis uzlu i soustavy (Převzato z [2])

Definujeme tři základní typy uzlů na základě těchto čtyř aktivních veličin, kdy jsou dvě vždy zadane a zbytek dvě se dopočítávají.

Typy uzlů:

- **Odběrový uzel (P, Q)** – Představuje odběratele v uzlu, který odebírá elektrickou energii. Kde P_i a Q_i je zadane, φ_i a U_i se dopočítá.
- **Regulační uzel (P, U)** – Uzel se zadane U_i a P_i, Q_i a φ_i . Představuje uzel se zapojenou elektrárnou, kompenzační prvky nebo regulační transformátor do sítě.

- **Referenční uzel** (U, φ) – Uzel se zadaným U_i a φ_i , a neznámým P_i, Q_i .

Referenční uzel je z praktického hlediska zcela fiktivním uzlem, neboť se žádný uzel sám nepodílí na krytí celkových výkonových ztrát sítě. Jako referenční uzel nejčastěji volíme PU uzel, který je největším zdrojem výkonu v síti. V některých případech lze za referenční uzel zvolit i odběrový uzel, například pokud je připojen na nejvyšší napěťové hladině nebo je propojen se zahraničními přenosovými soustavami.

Vstupní data obsahují topologii sítě, včetně hodnot impedancí/admitancí všech prvků (kondenzátory, transformátoru, vedení, reaktory) a hodnot jejich maximálního zatížení, fixní převody transformátorů nebo regulační rozsahy převodu pro transformátory s přepínáním odboček, vstupní data jednotlivých typů uzlů. [2]

1.2 Uzlová admitanční matice

Pro popis proudových a napěťových poměrů v každém uzlu sítě se používá následující maticový zápis.

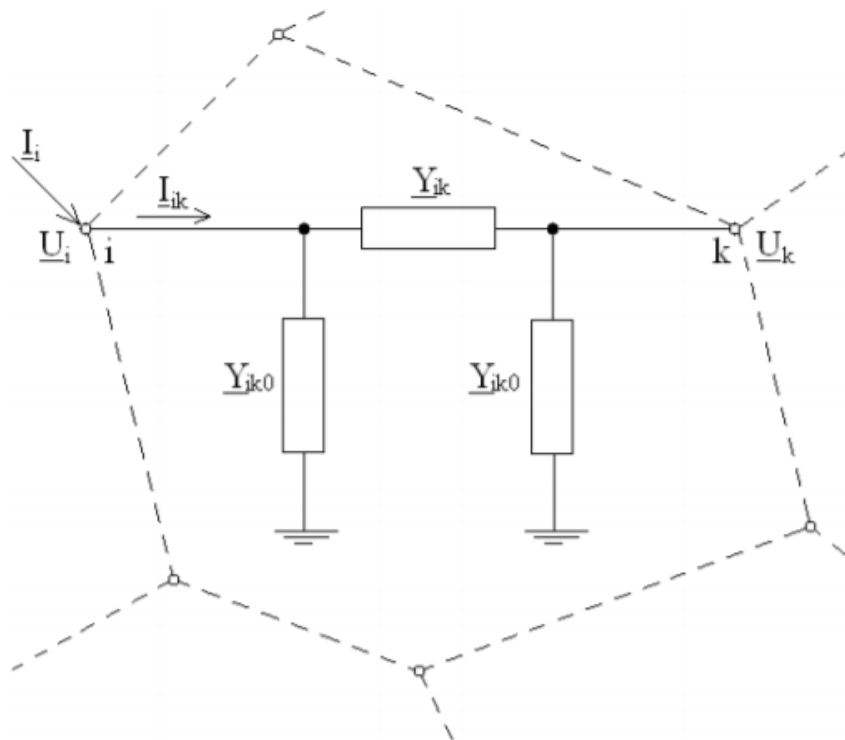
$$\sqrt{3} \cdot \underline{I} = \underline{A} \cdot \underline{U} \quad (1.1-1)$$

$$\underline{U} = \sqrt{3} \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I} \quad (1.1-2)$$

Kde je:

- \underline{I} - sloupcový $[m,1]$ vektor komplexních injektovaných proudů
- \underline{U} - sloupcový $[m,1]$ vektor komplexních sdružených uzlových napětí
- \underline{A} - čtvercová $[m,m]$ uzlová admitanční matice
- \underline{Z} - čtvercová $[m,m]$ uzlová impedanční matice
- m - celkový počet uzlů sítě

K řešení sítí pomocí metody uzlových napětí používáme uzlovou admitanční matici, která definuje konfiguraci sítě včetně pasivních prvků. Pro odvození admitanční matice uvažujeme jednoduchou síť tvořenou pouze vedeními viz Obr. 1-2. Kde každé vedení je modelováno pomocí náhradního π článku.



Obr. 1.5.1-1 Detail sítě pro vyjádření uzlové admitanční matice (převzato z [2])

Jeho příčné a podélné admitance lze vyjádřit:

$$\underline{Z}_{ik} = R_{ik} + jX_{ik} \quad [\Omega] \quad (1.1-3)$$

$$\underline{Y}_{ik} = \frac{1}{\underline{Z}_{ik}} = \frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}} = \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} - j \frac{X_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} = G_{ik} + jB_{ik} \quad [S] \quad (1.1-4)$$

$$\underline{Y}_{ik0} = \frac{1}{2} (G_{ik0} + jB_{ik0}) \quad [S] \quad (1.1-5)$$

Pro celkový injektovaný proud platí:

$$\underline{I}_i = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m \underline{I}_{ik} \quad (1.1-6)$$

Pro větvový proud tekoucí z uzlu i do uzlu k platí:

$$\sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ik} = \underline{U}_i \cdot \underline{Y}_{ik0} + (\underline{U}_i - \underline{U}_k) \cdot \underline{Y}_{ik} = \underline{U}_i \cdot (\underline{Y}_{ik0} + \underline{Y}_{ik}) - \underline{U}_k \cdot \underline{Y}_{ik} \quad (1.1-7)$$

Celý injektovaný proud je pak roven:

$$\sqrt{3} \cdot \underline{I}_i = \underline{U}_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m (\underline{Y}_{ik0} + \underline{Y}_{ik}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m \underline{U}_k \cdot \underline{Y}_{ik} \quad (1.1-8)$$

Podobnou závislost lze získat rozepsáním příslušného řádku z rovnice (1.1-1):

$$\sqrt{3} \cdot \underline{I}_j = \underline{A}_{i1} \cdot \underline{U}_1 + \underline{A}_{i2} \cdot \underline{U}_2 + \dots + \underline{A}_{ij} \cdot \underline{U}_j + \dots + \underline{A}_{ik} \cdot \underline{U}_k + \dots + \underline{A}_{im} \cdot \underline{U}_m \quad (1.1-9)$$

Porovnáním rovnic (1.1-8) a (1.1-9) získáme předpis pro prvky uzlové admitanční matice na hlavní diagonále a mimo hlavní diagonálu.

$$\underline{A}_{ii} = \sum_{\substack{k= \\ k \neq i}}^m (\underline{Y}_{ik0} + \underline{Y}_{ik}) \quad \underline{A}_{ik} = -\underline{Y}_{ik} \quad (1.1-10)$$

Uzlovou impedanční matici lze získat inverzí admitanční matice.

$$\underline{Z} = \underline{A}^{-1} \quad (1.1-11)$$

Uzlová admitanční matice má řadu výhod v porovnání s impedanční maticí

- Pokud síť neobsahuje transformátory, je matice symetrická
- Je diagonálně dominantní, obsahuje obecná komplexní čísla
- Řídká (nulové hodnoty mimodiagonálních admitancí pro nepropojené uzly)
- Snadný přepočítání při změnách konfigurace sítě

Odpojení větve i-k:

$$A_{i,k-nove} = A_{k,i-nove} = 0$$

$$A_{i,i-nove} = A_{i,i-stare} - Y_{ik0} - Y_{ik}$$

$$A_{k,k-nove} = A_{k,k-stare} - Y_{ik0} - Y_{ik}$$

Připojení větve k-i:

$$A_{i,k-nove} = A_{k,i-nove} = -Y_{ik}$$

$$A_{i,i-nove} = A_{i,i-stare} + Y_{ik0} + Y_{ik} \quad (1.1-12)$$

$$A_{k,k-nove} = A_{k,k-stare} + Y_{ik0} + Y_{ik}$$

1.3 Ustálený chod sítě jako nelineární úloha

Pro řešení čtyř a více uzlových sítí již není vhodný analytický postup, ale je nutno využít numerickou metodu. Uzlové rovnice v soustavě (1.2-1) jsou nelineární, neboť neznámá uzlová napětí jsou obsažena jak ve vektoru neznámých, tak ve jmenovatelích vlevo.

$$\begin{bmatrix} \frac{P_1 - jQ_1}{U_1^*} \\ \vdots \\ \frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} \\ \vdots \\ \frac{P_m - jQ_m}{U_m^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \cdots & \underline{A}_{1i} & \cdots & \underline{A}_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{A}_{i1} & \cdots & \underline{A}_{ii} & \cdots & \underline{A}_{im} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{A}_{m1} & \cdots & \underline{A}_{mi} & \cdots & \underline{A}_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \vdots \\ \underline{U}_i \\ \vdots \\ \underline{U}_m \end{bmatrix} \quad (1.2-1)$$

Princip numerické metody spočívá v tom, že je proveden odhad počátečního řešení a během jednoho výpočtu tzv. iterace, dojde k nalezení nového odhadu, který by měl být blíže k hledanému řešení. Výpočet se stále opakuje, dokud se hodnota odhadu neustálí (Konvergence). V případě konvergence se výpočet zastaví, pokud odhad bude splňovat povolenou odchylku ε , což je rozdíl mezi aktuálním vypočteným odhadem a odhadem vypočteným v předchozí iteraci. Pro případ, kdyby nedošlo k ustálení, ale divergenci. Je nastaven maximální počet iterací p_{max} po jehož dosažení je výpočet ukončen.

1.4 Newton-Raphsonova metoda

Metoda založená na postupném zpřesňování odhadu je využívána hlavně díky tomu, že převádí řešení nelineárních rovnic na řešení lineárních. A to hlavně za pomoci Taylorova rozkladu.

Provede se odhad kořenů v nulté iteraci $\rightarrow x_1^{(0)}, \dots, x_m^{(0)}$

Který se liší od přesné hodnoty o $\rightarrow \Delta x_1, \dots, \Delta x_m$

Přesná hodnota kořenů je tedy:

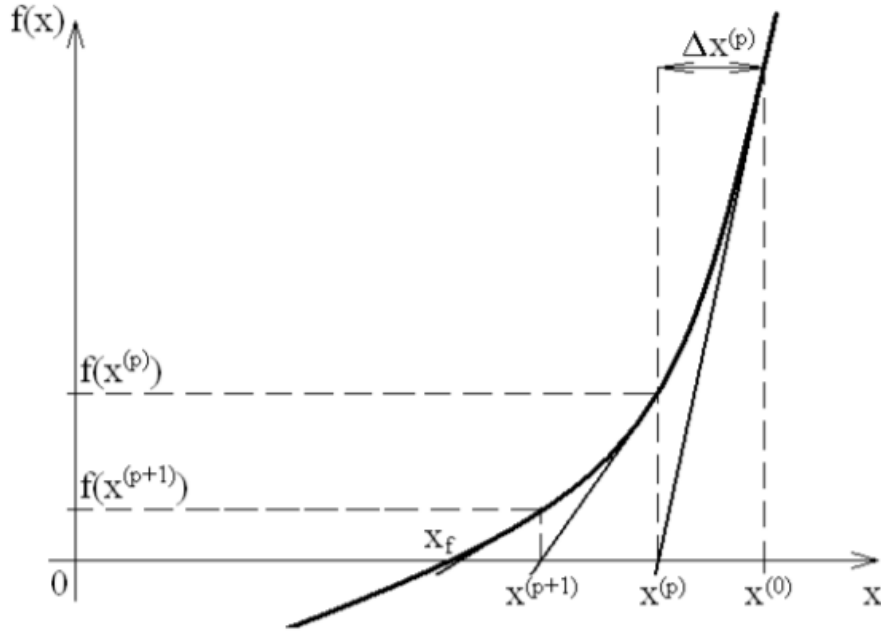
$$x_1 = x_1^{(0)} + \Delta x_1 \quad x_m = x_m^{(0)} + \Delta x_m \quad (1.3-1)$$

Vznikne soustava rovnic ve tvaru:

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, \dots, x_m^{(0)} + \Delta x_m) &= b_1 \\ &\vdots \\ f_m(x_1^{(0)} + \Delta x_1, \dots, x_m^{(0)} + \Delta x_m) &= b_m \end{aligned} \quad (1.3-2)$$

Rovnice lze přepsat pomocí Taylorova rozvoje, kdy se zanedbávají vyšší řády kvůli zanedbatelné hodnotě ΔX , pro linearizaci v okolí pracovního bodu.

$$f(x_1^{(0)}, \dots, x_m^{(0)}) + \Delta x_1 \cdot \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_1^{(0)}} + \dots + \Delta x_m \cdot \left. \frac{\partial f}{\partial x_m} \right|_{x_m=x_m^{(0)}} = b \quad (1.3-3)$$



Obr. 1.5.1-1 Grafické chování N-R metody [2]

Pro řešení chodu soustavy lze výkonové rozdíly odvodit buď v kartézských, nebo polárních souřadnicích. Například takto:

$$\underline{S}_i^* = \underline{P}_i - j\underline{Q}_i = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_i \cdot \underline{U}_i^* = \left(\sum_{k=1}^m \underline{A}_{ik} \cdot \underline{U}_k \right) \cdot \underline{U}_i^* \quad (1.3-9)$$

Pak platí:

$$\begin{aligned} P_i - jQ_i &= \sum_{k=1}^m [(G_{ik} + jB_{ik}) \cdot U_k \cdot (\cos\theta_k + j\sin\theta_k) \cdot U_i \cdot (\cos\theta_i - j\sin\theta_i)] \\ &= \sum_{k=1}^m [U_i \cdot U_k \cdot (G_{ik} + jB_{ik}) \cdot (\cos\theta_{ik} - j\sin\theta_{ik})] \end{aligned} \quad (1.3 - 10)$$

$$\text{Kde: } \text{Real}\{A_{ii}\} = G_{ii} \quad \text{Real}\{A_{ik}\} = G_{ik} \quad \text{Imag}\{A_{ii}\} = B_{ii} \quad \text{Imag}\{A_{ik}\} = B_{ik}$$

Vztahy pro rozdílové výkony získáme porovnáním reálných a imaginárních částí

$$\begin{aligned} P_i &= U_i \cdot \sum_{k=1}^m U_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} + B_{ik} \cdot \sin\theta_{ik}) \rightarrow \Delta P_i = P_i - U_i \cdot \sum_{k=1}^m U_k \cdot (G_{ik} \cdot \cos\theta_{ik} + B_{ik} \cdot \sin\theta_{ik}) \\ Q_i &= U_i \cdot \sum_{k=1}^m U_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cdot \cos\theta_{ik}) \rightarrow \Delta Q_i = Q_i - U_i \cdot \sum_{k=1}^m U_k \cdot (G_{ik} \cdot \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cdot \cos\theta_{ik}) \end{aligned} \quad (1.3-11)$$

Význam rozdílových rovnic $\Delta P_i, \Delta Q_i$ v (1.3-11) spočívá ve vyjádření vzdálenosti vypočtených stavových hodnot v aktuální iteraci od konečného řešení. Jsou vhodné k rozhodování, zda hledané řešení již bylo dosaženo se zadanou přesností. Obě rovnice musí být použity pro každý PQ uzel, pro PU uzly je brána jen první rovnice, pro referenční uzel žádná z rovnic. [2]

Konečný maticový zápis pro řešení chodu soustavy:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^{(p)} \\ \Delta \mathbf{Q}^{(p)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{(p)} & \mathbf{N}^{(p)} \\ \mathbf{J}^{(p)} & \mathbf{L}^{(p)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^{(p+1)} \\ \frac{\Delta \mathbf{U}^{(p+1)}}{\mathbf{U}^{(p)}} \end{bmatrix} \quad (1.3-12)$$

Jakobián je složen ze čtyř submatic H, N, J a L, které jsou definovány parciálními derivacemi:

$$H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} \quad N_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial U_k} \quad J_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} \quad L_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_k} \quad (1.3-13)$$

Vlastnosti Jakobiho matice

- Je velmi řídká
- Je silně diagonálně dominantní
- Je symetrická

Pro vyřešení soustavy (1.3-12) se přírůstky $\Delta \boldsymbol{\theta}$ a $\Delta \mathbf{U}/\mathbf{U}$ použijí na aktualizaci stavových proměnných: [2]

$$\theta_i^{(p+1)} = \theta_i^{(p)} + \Delta \theta_i^{(p+1)} \quad U_i^{(p+1)} = U_i^{(p)} + \frac{\Delta U_i^{(p+1)}}{U_i^{(p)}} \cdot U_i^{(p)} \quad (1.3-14)$$

Pro každý PU uzel jsou hodnoty Q_i a Q_{Gi} neznámé, a proto je potřeba je v každé iteraci vypočítat. [2]

$$Q_i^{(p+1)} = U_i^{(p+1)} \cdot \sum_{k=1}^m U_k^{(p+1)} \cdot (G_{ik} \cdot \sin \theta_{ik}^{(p+1)} - B_{ik} \cdot \cos \theta_{ik}^{(p+1)}) = Q_{Gi}^{(p+1)} + Q_{Li} \quad (1.3-15)$$

Tento vypočtený rozdílový vektor se použije pro konvergenční kritérium.

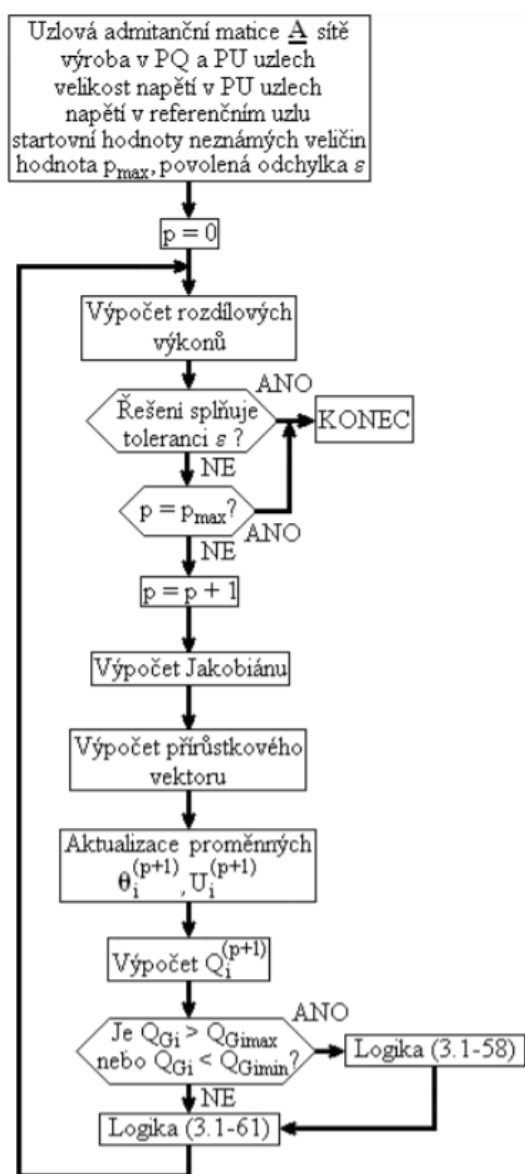
$$\max \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} \leq \varepsilon \quad (1.3-16)$$

Výhody použití N-R metody:

- Kvadratická rychlost konvergence
- Časové nároky na výpočet jsou nízké
- Počet iterací není závislý na velikost sítě
- Lze provést citlivostní analýzu s využitím parciálních derivací Jakobiánu

Nevýhody použití N-R metody:

- Silná závislost na počátečním odhadu stavových veličin
- Komplikovanější matematický model
- Vysoké požadavky na paměť
- Počet iterací je ovlivněn zahrnutím jalových mezí pro PU uzly a regulačních transformátorů
- Silná nejistota během aktualizací procesu stavových veličin



Obr. 1.5.1-2 Diagram iteračního procesu Newton-Raphsonovy metody. [2]

1.5 Podmínky připojitelnosti

Podmínky pro připojení výroben elektřiny, distribučních soustav a odběrných míst zákazníků k elektrizační soustavě stanovuje vyhláška č. 16/2016 Sb. Vyhláška podle §3 stanovuje: [4]

„(1) Podmínkami připojení zařízení žadatele k přenosové soustavě nebo distribuční soustavě jsou

- a) Žádost o připojení
- b) Studie připojitelnosti za podmínek podle § 6 a 7
- c) Smlouva o připojení mezi žadatelem a provozovatelem přenosové soustavy nebo provozovatelem distribuční soustavy nebo změna stávající smlouvy o připojení.“ [4]

Dle § 6 provozovatel přenosové soustavy nebo provozovatel distribuční soustavy může žádat od žadatele studii připojitelnosti zejména v případě:

- „ a) je-li s přihlédnutím ke všem okolnostem zřejmé, že zařízení, o jehož připojení žadatel žádá, bude mít vliv na provoz přenosové soustavy nebo distribuční soustavy
- b) žádá-li se o připojení zařízení k napěťové hladině vysokého napětí a vyšších.“ [4]

1.5.1 Studie připojitelnosti

Studie připojitelnosti výroby obsahuje technické posouzení možného připojení výroby podle platných Pravidel provozování distribučních soustav (příloha č.4) a je často vyžadována provozovatelem distribuční soustavy.

- Studie se zpracovává s ohledem na:
- Napěťové poměry ve všech posuzovaných uzlech sítě,
- Zatížitelnost jednotlivých prvků sítě,
- Dodržení parametrů zpětných vlivů na distribuční soustavu tj, - zejména **změny napětí vyvolané trvalým provozem výroby**, změny napětí při spínání, útlumu signálu HDO, flikru, harmonických a dalších kritérií daných Pravidel provozování distribučních soustav. [6]

1.5.2 Zvýšení napětí

Při ustáleném chodu sítě a za normálních podmínkách nesmí zvýšené napětí způsobené provozem připojených výroben v síti vn a 110 kV překročit 2 % oproti napětí v síti bez jejich připojení.

$$\Delta u_{vn,110} \leq 2\%$$

Pro výroby v síti nn nesmí zvýšení napětí překročit 3 %

$$\Delta u_{nn} \leq 3\%$$

Při náhradních dodávkách nesmí zvýšené napětí vyvolané provozem připojených výroben nebo způsobené připojováním a odpojováním jednotlivých generátorů překročit 5 % pro výrony s přípojným místem v síti vn ve srovnání bez jejich připojení. [5]

1.6 Ekonomické zhodnocení

Protože finanční prostředky nejsou neomezené je zapotřebí zajistit, aby byly vynakládány účelně a efektivně. Vypracování kvalitního rozboru ekonomické efektivity investiční výstavby energetického díla vyžaduje technické i ekonomické znalosti. Výhodnost energetických investic se posuzuje technicko-ekonomickou efektivností.

Cílem použití kritérií technicko-ekonomické efektivity je:

- Vybrat optimální variantu způsobu provozu nebo projektované investice, která zajistí podnikatelskému subjektu maximální zisk při dodržení limitovaného objemu investičních prostředků.
- Sestavit pořadí jednotlivých posuzovaných variant projektů podle jejich technicko-ekonomické efektivity

V současné době se nejvíce využívají k hodnocení efektivity tato obecná kritéria:

- Čistá současná hodnota (NPV – net present value)
- Vnitřní výnosové procento (IRR – internal rate of return)
- Doba návratnosti (PP – payback period)

Čistá současná hodnota (NPV)

Jedná se o rozdíl mezi diskontovanými peněžními příjmy a diskontovanými jednorázově vloženými prostředky za dané období. Představuje nejpřesnější způsob ekonomického vyhodnocování projektu.

$$NPV = \sum_{T=1}^{T_p} CF_T \cdot (1 + r)^{-T} \quad (1.6 - 1)$$

Kde je:

NPV	- čistá současná hodnota
CF_T	- čistý peněžní tok (cash flow) v jednotlivých letech
r	- diskontní sazba
T	- 1,2,3,.. – pořadové číslo hodnoceného roku
T_p	- doba posouzení

Vnitřní výnosové procento (RR)

Lze definovat jako úrokovou míru, při které se současná hodnota peněžních příjmů z investice rovná současné hodnotě kapitálových výdajů.

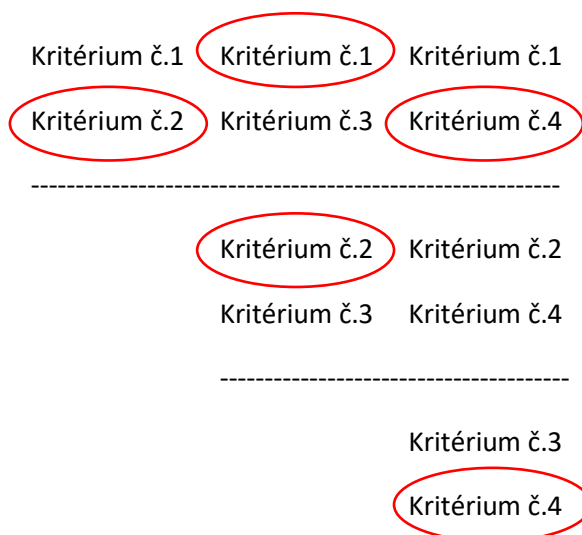
$$NPV = \sum_{T=1}^{T_p} CF_T \cdot (1 + IRR)^{-T} = 0 \quad (1.6 - 2)$$

Doba návratnosti (PP)

Počet let, za který se kapitálový výdaj splatí peněžními příjmy z investice. Metodu nelze brát jako všeobecné kritérium, poskytuje však důležitou informaci o riziku investice.

1.6.1 Rozhodovací analýza

Abychom u analýz, kde je mnoho kritérií tzv. Vícekritériálních úloh nedošli ke špatnému nebo subjektivnímu řešení, snažíme se vytvořit pořadí jednotlivých kritérií a přiřadit jim váhu. Úkolem je vybrat nejvhodnější variantu co možná nejobjektivnějším způsobem. Vhodným způsobem stanovení vah je párové srovnání, který provádíme pomocí trojúhelníka párů. V prvním dvojřádku se srovnává důležitost kritéria č. 1 s důležitostí všech kritérií ostatních, ve druhém řádku se takto porovnává kritérium č. 2 atd. až se nakonec porovnají poslední dvě kritéria. Volíme vždy ze dvou kritérií, kde to lepší vyznačíme. Váhu pak získáme sečtením, kolikrát bylo každé kritérium označeno.



Celkový počet bodu dosaženou určitou alternativou je pak dán:

$$B = \sum v_f \cdot b_f \quad (1.6.1-1)$$

Váha se vypočte:

$$v_f = \frac{\text{Počet výněru daného kritéria}}{\text{Celkový počet párového srovnání}} \quad (1.6.1-2)$$

1.6.2 Multikriteriální analýza

Základním cílem vícekriteriální analýzy je prošetřovat velké množství alternativ a seřadit je podle jejich výhodnosti. Úlohy lze charakterizovat pomocí tzv. kriteriální matice, kde sloupce odpovídají kritériím a řádky hodnoceným variantám. Označíme-li prvky kriteriální matice y_{ij} , kde $i = 1, 2, \dots, p$ a $j = 1, 2, \dots, k$, můžeme kriteriální matici zapsat ve tvaru:

$$\begin{matrix} & f_1 & f_2 & \cdots & f_k \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{matrix} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1k} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{p1} & y_{p2} & \cdots & y_{pk} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1.6.2-1)$$

1.6.2.1 Metoda váženého součtu – WSA

Vychází z maximalizace užitku. Nelepší varianta je ta, která se blíží maximální hodnotě. Principem metody je vytvoření normalizované kriteriální matice $\mathbf{R} = (r_{ij})$ z kriteriální matice $\mathbf{Y} = (y_{ij})$ pomocí transformačního vzorce:

$$r_{ij} = \frac{y_{ij} - D_j}{H_j - D_j} \quad (1.6.2-2)$$

Kde D_j odpovídá minimální hodnotě kritéria ve sloupci j a H_j odpovídá maximální hodnotě kritéria ve sloupci j . Tento vzorec platí v případě maximalizačního kritéria. Pro minimalizační kritérium použijeme tento vzorec:

$$r_{ij} = \frac{H_j - y_{ij}}{H_j - D_j} \quad (1.6.2-3)$$

Užitek varianty pak vypočteme:

$$u(a_i) = \sum_{j=1}^k v_j \cdot r_{ij} \quad (1.6.2 - 4)$$

Kde nejvyšší hodnota odpovídá nejlepší variantě.

Kromě metody váženého součtu (WSA) ještě existuje:

- Metoda ideálních bodů (IPA)
- Metoda TOPSIS
- Metoda shody a neshody (CDA)

2 Zkraty v síti

Zkrat můžeme definovat jako náhodné či úmyslné vodivé spojení mezi fázemi nebo zemí a fázemi, která vedou ke vzniku velkých zkratových proudů.

Mezi příčiny zkratu můžeme zařadit:

- Stárnutí izolace
- Atmosférická přepětí
- Mechanické poškození izolace
- Špatná údržba zařízení

A účinky zkratů jsou:

- Dynamické – dochází k mechanickému namáhání.
- Tepelné – Dochází k tepelnému namáhání průchodem zkratového proudu.
- Pokles napětí

2.1 Základní pojmy

Zkratový proud – Nadproud, který vzniká v elektrizační soustavě v důsledku zkratu. [8]

Počáteční rázový zkratový proud I_k'' - efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku zkratu. [8]

Nárazový zkratový proud i_p – maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu. [8]

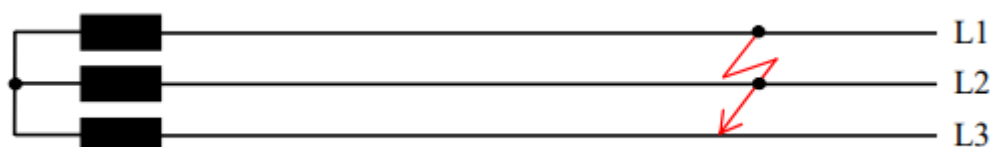
Ustálený zkratový proud I_k – efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu. [8]

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} - efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění. [8]

2.2 Druhy zkratů

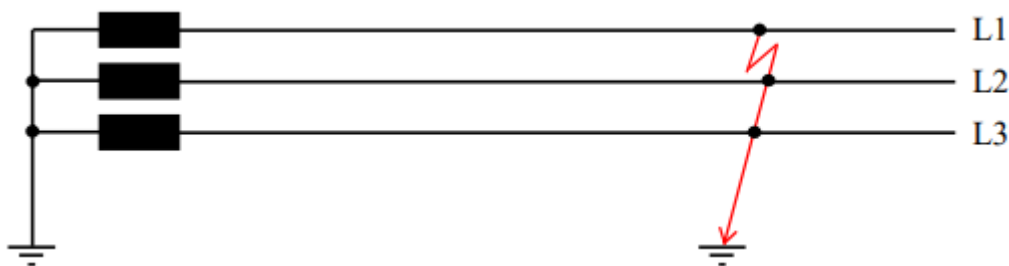
Souměrné zkraty

Trojfázový zkrat – Nastane při spojení všech tří fází v jednom místě. Může vznikat v sítích TT, IT. Velikost zkratového proudu je omezena pouze velikostí sousledné složky impedance.



Obr. 1.6.2-1 Schéma trojfázového zkratu [7]

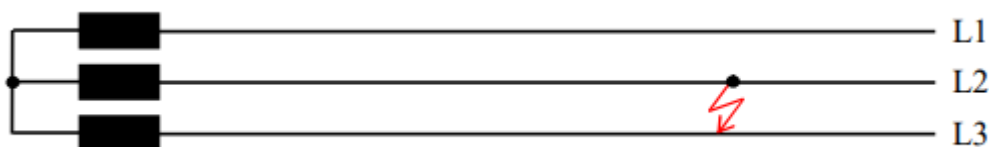
Trojfázový zemní zkrat – Podobně jako o třífázového dochází ke spojení všech tří fází v jednom místě, a navíc dochází ke spojení se zemí. Může vzniknout pouze v síti s uzemněným uzlem (TT).



Obr. 1.6.2-2 Schéma trojfázového zemního zkratu [7]

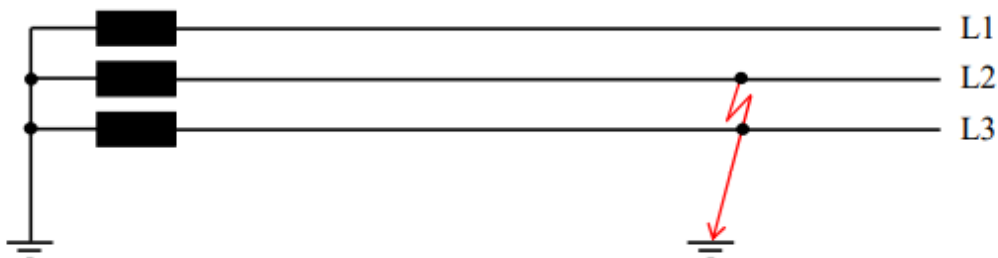
Nesouměrné zkraty

Dvojfázový zkrat – Nastane při spojení kterýchkoliv dvou fází v elektrizační soustavě. Může nastat v síti IT, TT. Velikost zkratového proudu je omezena velikostí sousledné a zpětné složky impedance.



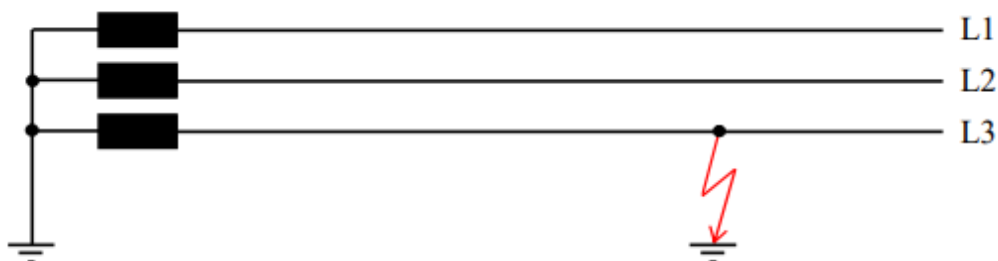
Obr. 1.6.2-3 Schéma dvoufázového zkratu [7]

Dvojfázový zemní zkrat – Podobně jako dvoufázový zkrat, navíc je ještě spojen se zemí. Vzniká v soustavě TT.



Obr. 1.6.2-4 Schéma dvoufázového zemního zkratu [7]

Jednofázový zkrat – Vzniká při spojení jedné fáze se zemí v soustavě TT. Velikost zkratového proudu je ovlivněna také netočivou složkou impedance.



Obr. 1.6.2-5 Schéma jednofázového zkratu [7]

2.3 Výpočty zkratových poměrů

Důvodem výpočtu zkratových poměrů v síti je volba a dimenzování elektrických zařízení v síti na účinky zkratových proudů nebo dimenzování ochran v obvodu. Pro dimenzování elektrických zařízení určujeme maximální možný zkratový proud. Naopak při dimenzování ochran určujeme nejvyšší hodnotu zkratového proudu. [7]

Při výpočtu maximálního zkratového proudu se uvažuje:

- Chod zdrojů v síti s jmenovitým napětím, výkonem a účínkem.
- Napěťový součinitel c_{max}
- Chod motorů
- Konfiguraci sítě s maximálními příspěvky, tak aby v místě zkratu dávali největší zkratové proudy.
- Při uvažování rezistencí vodičů je jejich teplota 20°

Při výpočtu minimálního zkratového proudu se uvažuje:

- Konfiguraci sítě s minimálními příspěvky, tak aby v místě zkratu dávali nejmenší hodnoty zkratových proudů. (tj. při paralelní kombinaci dvou transformátorů se uvažuje pouze jedno)
- Zanedbání vlivu motorů
- Napěťový součinitel c_{min}
- Snížený počet zdrojů pracujících do místa zkratu
- Při uvažování rezistencí vodičů je jejich teplota 80° pro venkovní vedení a maximální možná pro kabelová vedení.

Zjednodušující předpoklady při výpočtu zkratových proudů:

- Předpokládá se kovový zkrat, tedy zanedbáváme vliv elektrického oblouku (odpor oblouku).
- Po dobu trvání zkratu se nemění typ zkratu a ani nedochází ke změně sítě.
- Uvažují se jmenovité impedance strojů a jmenovité převody transformátorů.
-
- Zanedbávají se některé prvky příčných admitancí.

Napěťový součinitel c

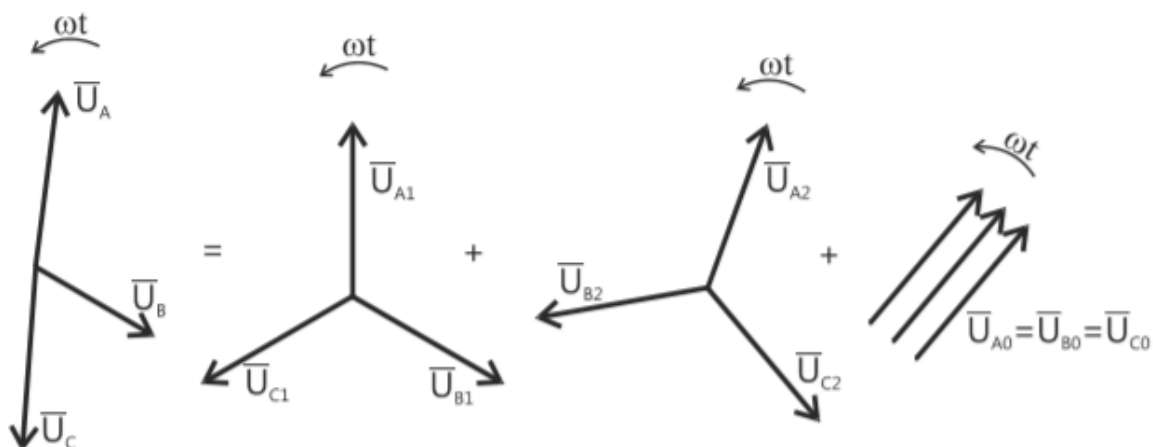
Tabulka 2.3-1 Napěťový součinitel c

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů $c_{\max}^{1)}$	minimálních zkratových proudů c_{\min}
Nízké napětí 100V až 1000V (IEC 60038, tabulka I)	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí >1 kV až 35 kV (IEC 60038, tabulka III)	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí²⁾ > 35 kV (IEC 60038, tabulka IV)		

¹⁾ $c_{\max} \cdot U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav.
²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno, potom $c_{\max} \cdot U_n = U_m$ nebo v $c_{\min} \cdot U_n = 0,90 \cdot U_m$.
³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí + 6%, například pro soustavy přecházející z 380V na 400V.
⁴⁾ Pro soustavy s tolerancí napětí + 10%.

2.3.1 Rozklad do souměrných slokových soustav

V trojfázové soustavě lze každou hvězdičku nesymetrických fázorů nahradit složením symetrických fázorů sousledné, zpětné a netočivé soustavy. [9]



Obr. 2.3.1-1 Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými fázory [9]

Součet fázorů symetrických složek sousledné, zpětné a netočivé složky je roven původnímu nesymetrickému vektoru. [9]

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{A1} + \bar{U}_{A2} + \bar{U}_{A0} \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_{B1} + \bar{U}_{B2} + \bar{U}_{B0} \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_{C1} + \bar{U}_{C2} + \bar{U}_{C0}\end{aligned}\quad (2.3.1-1)$$

Zvolíme-li referenční fází fází A. dostaneme z rovnice (2.3.1-1):

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_1 + \bar{a} \cdot \bar{U}_2 + \bar{U}_0 \\ \bar{U}_C &= \bar{a} \cdot \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_2 + \bar{U}_0\end{aligned}\quad (2.3.1-2)$$

Pro operátor \bar{a} platí:

$$\bar{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \bar{a}^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.3.1-3)$$

Jestliže označíme nesymetrickou soustavu fázorů napětí \bar{U}_F a symetrickou soustavu fázorů napětí \bar{U}_S . [9]

$$\bar{U}_F = \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} \quad \bar{U}_S = \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} \quad (2.3.1-4)$$

Pak je možné soustavu rovnic (2.3.1-2) přepsat do maticového tvaru, kde \bar{F} je desymetrizační transformační matice. [9]

$$\bar{U}_F = \bar{F} \cdot \bar{U}_S \quad \rightarrow \quad \bar{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3.1-5)$$

Determinant matice \bar{F} je různý od nuly a lze provést její inverzi a přejít tak od fázových hodnot k hodnotám souměrných složek. [9]

$$\bar{U}_S = \bar{F}^{-1} \cdot \bar{U}_F \quad \rightarrow \quad \bar{F}^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3.1-6)$$

Tomu odpovídá soustava rovnic.

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{a} \cdot \bar{U}_B + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_C) \\ \bar{U}_2 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_B + \bar{a} \cdot \bar{U}_C) \\ \bar{U}_0 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C)\end{aligned}\quad (2.3.1-7)$$

2.3.2 Metoda superpozice

Navazuje na výpočet rozložení proudů a napětí v soustavě před zkratem. Je třeba vycházet ze znalosti odběrů a zatížení zdrojů v ustáleném chodu soustavy. Ze známých hodnot vektorů napětí na svorkách generátorů, jejich proudové zatížení a vnitřních impedancí se pak stanoví vnitřní napětí generátorů a rozložení napětí a proudů v soustavě při zkratu. [10]

2.3.3 Metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu

Při výpočtu je uvažován jediný zdroj napětí v soustavě, všechny ostatní prvky jsou nahrazeny svými zkratovými impedancemi a místo vnitřních napětí zdrojů zkratového proudu jsou uvažovány zkratující spoje. Napětí ekvivalentního napěťového zdroje je odvozeno ze jmenovitého napětí sítě v místě zkratu vynásobením napěťovým součinitelem c . [10]

2.3.4 Výpočet dle ČSN EN 60909-0:2002

V normě je použita metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu, nevylučuje se však použití metody superpozice. Při ručním výpočtu se určuje výsledná zkratová impedance postupným zjednodušováním sítě. [10]

Pro počáteční rázový zkratový proud pro jednotlivé druhy zkratu platí:

$$\begin{array}{ccc} \text{1F zkrat} & \text{2F zkrat} & \text{1F zkrat} \\ I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|}, & I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|}, & I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} \quad [kA; -, kV, \Omega] \end{array} \quad (2.3.4-1)$$

Pro určování sousledných parametrů prvku ve fyzikálních jednotkách:

$$\text{Soustava } Z_{(1)} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k} \quad [\Omega] \quad (2.3.4-2)$$

$$\text{Alternátor } X_{(1)} = \frac{x'_d \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} \quad [\Omega; \%, kV, MVA] \quad (2.3.4-3)$$

$$\text{Dvouvinutové transformátory } Z_{(1)} = \frac{u_k \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} \quad [\Omega; \%, kV, MVA] \quad (2.3.4-4)$$

$$\text{Tlumivky (reaktory)} \quad Z_{(1)} = \frac{10 \cdot u_r \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad [\Omega; \%, kV, A] \quad (2.3.4-5)$$

$$\text{Vedení} \quad X_{(1)} = X_k \cdot l \quad \left[\Omega; \frac{\Omega}{km}, km \right] \quad R_{(1)} = R_k \cdot l \quad \left[\Omega; \frac{\Omega}{km}, km \right] \quad (2.3.4-6)$$

$$\text{Asynchronní motory} \quad Z_{(1)} = \frac{1}{i_z} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad [\Omega; -, kV, MVA] \quad (2.3.4-7)$$

$$\text{Přepočet na napěťovou hladinu} \quad Z_2 = Z_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad [\Omega; \Omega, kV, kV] \quad (2.3.4-8)$$

3 Výpočet ustáleného chodu sítě

V této kapitole se budu zabývat výpočtem ustáleného chodu sítě. Tyto výpočty jsou velmi důležité pro zajištění bezproblémového chodu sítě s ohledem na zatížení a úbytky napětí. V následujícím přehledu se budu zabývat výpočtem sestaveného zadání na kterém budu demonstrovat využití softwarových nástrojů jako je již zmíněný DNCalc. Studenti budou mít za úkol provést řadu výpočtů na kterých si osahají chování sítě při změně parametrů. Výhodou použití softwarových nástrojů je rychlý výpočet při změně parametrů sítě.

3.1 Představení programu DNCalc

Výpočetní program DNCalc je určen pro komplexní analýzu distribučních sítí, poskytuje robustní nástroje pro standardní výpočty distribučních sítí, ale i nástroje nadstavbové, které jsou určeny pro analýzu specifických oblastí provozu distribučních sítí, jakými jsou např. kvalita elektrické energie, připojitelnost zdrojů, SmartGrids, spolehlivost a další. Software DNCalc disponuje širokým spektrem prvků umožňujících uživateli věrohodný popis modelovaných problémů spojených s provozem distribučních sítí. Díky těmto nástrojům může uživatel analyzovat provoz distribučních sítí s respektováním aktuálních trendů vývoje elektroenergetiky. [1]

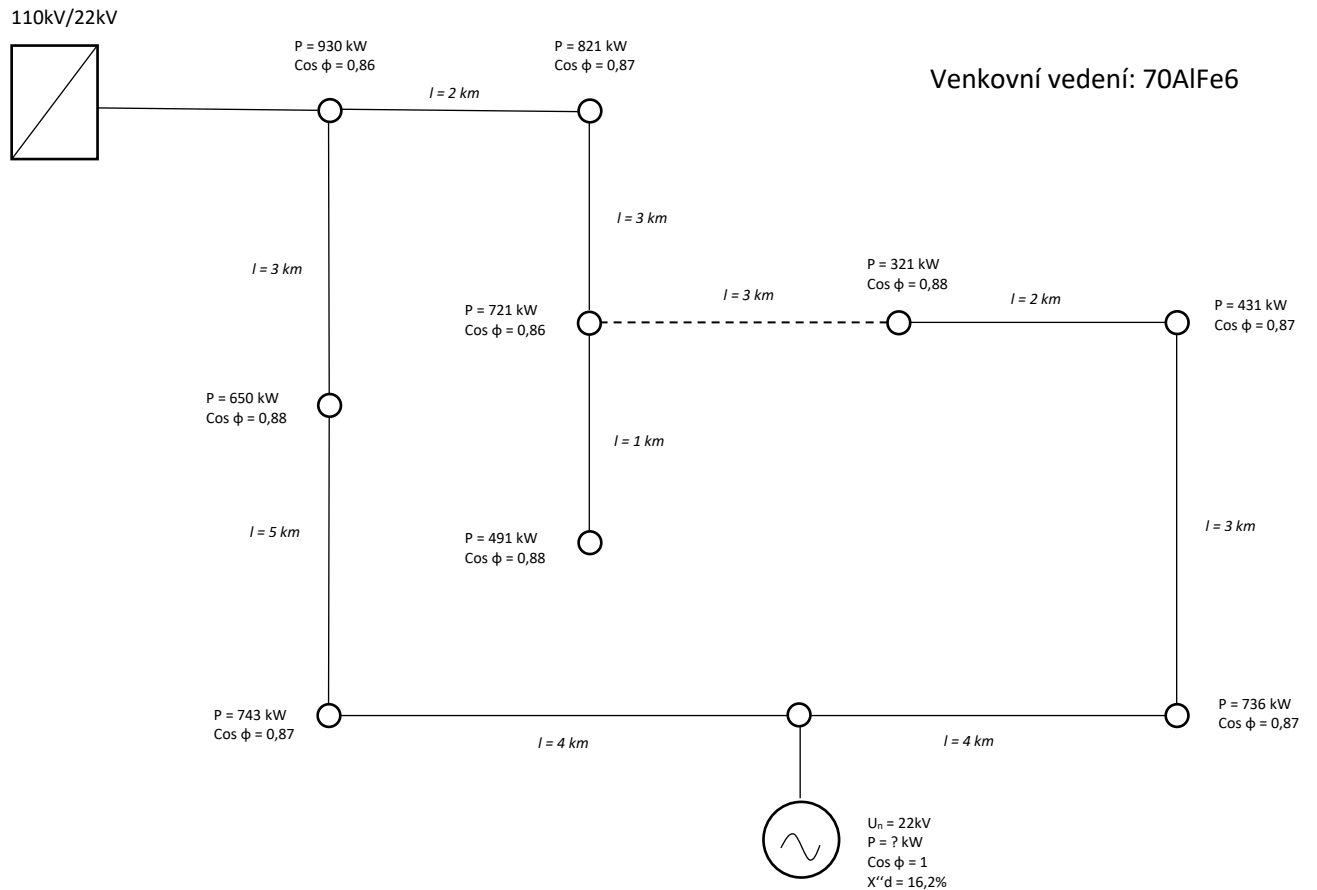
3.2 Popis instalace

Instalace se spustí dvojklikem na soubor DNCalcInstaller.exe. Pokud stávající uživatel nemá administrátorská práva, objeví se okno s požadavkem na zadání příslušného hesla. Poté uživatel provede volbu jazyka a potvrdí. Otevře se průvodce instalace, v průvodci zvolí „Další“. Objeví se nové dialogové okno s volbou adresáře pro instalaci programu. Výchozí umístění je v adresáři C:\Program Files\DNCalc. Kliknutím na tlačítko „Instalovat“ se zahájí instalace programu. Po dokončení instalace lze program DNCalc spustit.

3.3 Zadání

Na další straně můžete vidět navrhnuté zadání, na kterém je nakresleno schéma sítě se všemi potřebnými parametry. Při návrhu schéma jsem uvažoval síť napájenou z jedné strany. Obsahuje jeden napájecí transformátor 110kV/22kV o zdánlivém výkonu 25MVA a procentním napětím nakrátko 11 %. Dále se ve schématu nachází 9 odběrných míst s účínkem v rozsahu 0,85 až 0,89 a odebíraným činným výkonem v řádu stovek kW. Tyto odběrná místa jsou propojena venkovním vedením typu 70AlFe6. (Tedy lany AlFe6 s průřezem 70 mm). Délky vedení se pohybují v řádech jednotek km. Síť je rozdělena do dvou paprsků, přičemž konec jednoho paprsku je doplněno o tzv. „Záložní vedení“, které je v normálním stavu vypnuté. Ve schématu je připojen synchronní generátor, který je vhodně umístěný v takové vzdálenosti od napájecího transformátoru, aby se po připojení do sítě změnili napěťové poměry.

Návrh distribuční sítě



Zadání programu

- a) V programu DNCalc vypočtete ustálený chod sítě s odpojeným zdrojem a záložním vedením. V tabulce zobrazte úbytky napětí ve všech uzlech sítě a procentní zatížení všech prvků sítě (tj, úseky vedení, transformátor,...)
 - b) Provedte výpočet připojitelnosti s připojeným zdrojem a určete limitní činný výkon zdroje. A to tak, aby v celé síti nedošlo ke změně napětí o více než 2 %.
 - c) Zkonstruuje grafickou závislost $U=f(I)$. Graf doplňte úsečkou, která znázorňuje dovolený úbytek napětí (5 % z U na začátku vedení). A to pro:
 - Síť s odpojeným zdrojem a záložním vedením
 - Síť s odpojeným zdrojem a připojeným záložním vedením
 - Síť s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením
 - Síť s připojeným zdrojem a záložním vedením
- Dále po připojení zdroje s odpojeným záložním vedením zkonstruuje grafickou závislost $\Delta U_{\%} = f(I)$ s doplněním přímky znázorňující podmínky připojení do distribuční sítě (2 % z U)
- d) Provedte výpočet ustáleného chodu sítě s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením pro různá Q zdroje. Měňte Q zdroje a vynesete grafickou závislost $U = f(I)$. Provedte výpočet pro celkem 7 různých hodnot Q (3x kapacitní, nulovou a 3x induktivní). Dále do sloupcového grafu vynesete závislost celkových činných ztrát sítě $\Delta P = f(Q_z)$
 - e) Provedte výpočet ustáleného chodu sítě s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením pro 10 různých hodnot činného výkonu, při stejném $\cos\varphi = 1$ (Měňte v rozsahu od 0 do limitní hodnoty, který jsme vypočetli v bodě b).) Výsledky zanechte do grafu. Do sloupcového grafu vynesete závislost celkových činných ztrát sítě na instalovaném výkonu $\Delta P = f(P_i)$.
 - f) Provedte výpočet ustáleného chodu sítě s připojeným zdrojem, s připojeným záložním vedením a odpojení nejdříve jednoho paprsku na vývodu z napájecího transformátor 22kV, a poté i po odpojení druhého paprsku. Výstupem bude tabulka s procentním zatížením jednotlivých prvků sítě (úseky vedení, transformátor) a grafická závislost $U = f(I)$ s vyznačenou přímkou znázorňující 5% dovolený úbytek napětí.
 - g) Zpracujte ekonomické hodnocení zadané sítě. Výstup bude obsahovat specifikace zařízení sítě a výpočet investičních nákladů. Také bude obsahovat tabulky ekonomického hodnocení navržené varianty sítě na základě NPV.
 - h) Stanovte důležitost těchto čtyř kritérií: $f_1(NPV)$, $f_2(\Delta P)$, $f_3(P_{zdroje})$, $f_4(\Delta U_{max\%})$ metodou Fullerova trojúhelníku. Poté sestrojte kritériální matici z variant (1A až 4A nebo 1B až 4B nebo 1C až 4C, etc.) dle zadání. Pomocí metody váženého součtu (WSA) ji převedte na normalizovanou kritériální matici a stanovte pořadí jednotlivých variant.

$f_1(NPV)$... [–] ... čistá současná hodnota

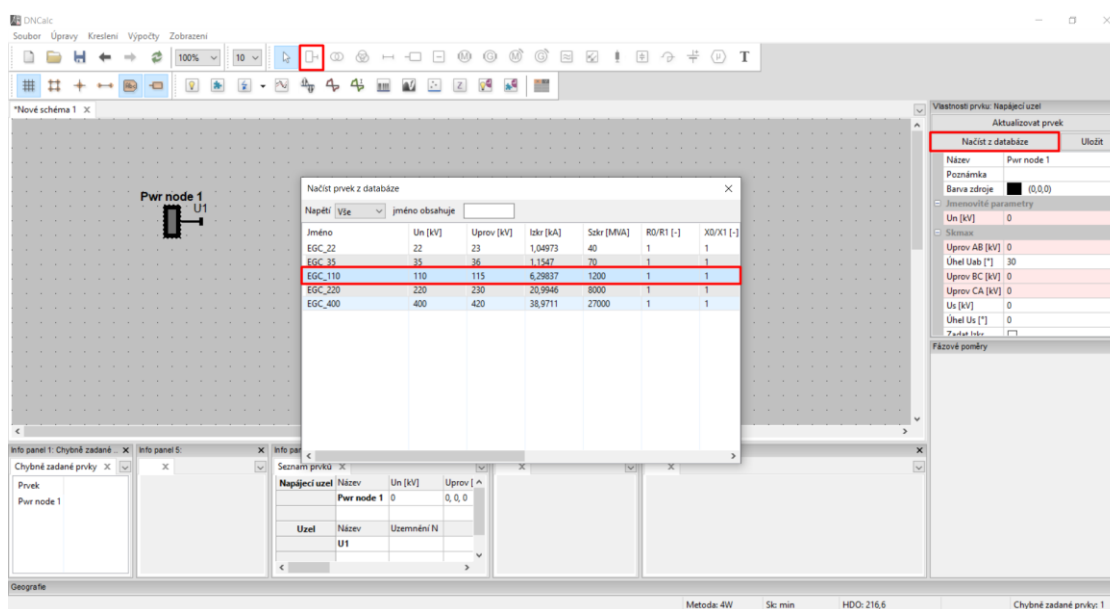
$f_2(\Delta P)$... [kW] ... činné ztráty v síti při odpojeném záložním vedení a připojeném synchronním generátorem

$f_3(P_{zdroje})$... [MW] ... limitní činný výkon synchronního generátoru

$f_4(\Delta U_{max\%})$... [%] ... maximální procentní úbytek napětí při odpojeném záložním vedení a připojeném synchronním generátoru

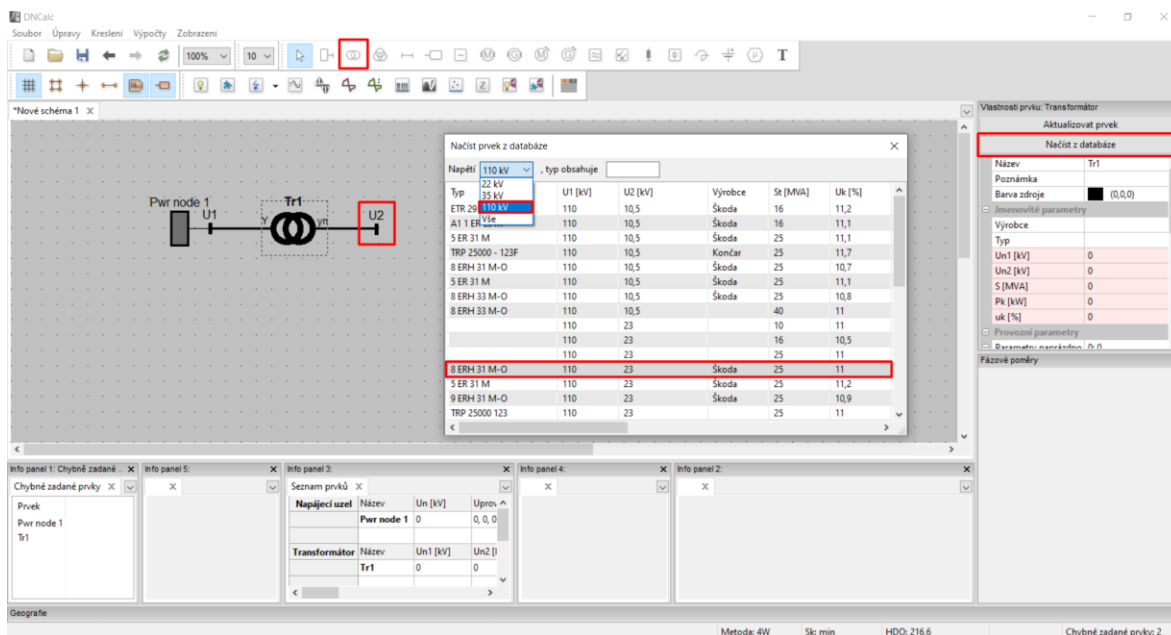
3.3.1 Modelování zadané úlohy v programu DNCalc

Než budeme moci provést výpočet ustáleného chodu zadané sítě, musíme ji v programu DNCalc namodelovat. Otevřeme program DNCalc. V horní liště vybereme prvek „Napájecí uzel“ nebo rozklikneme lištu „Kreslení -> Přidat napájecí uzel“, poté klikneme myší do libovolné oblasti pracovního pole. Tímto se napájecí uzel zobrazí na ploše. V pravém rohu vidíme tabulku „Vlastnosti prvku“, klikneme na možnost „Načíst z databáze“, zobrazí se nám okno, kde vybereme napájecí uzel pro hladinu napětí 110kV.



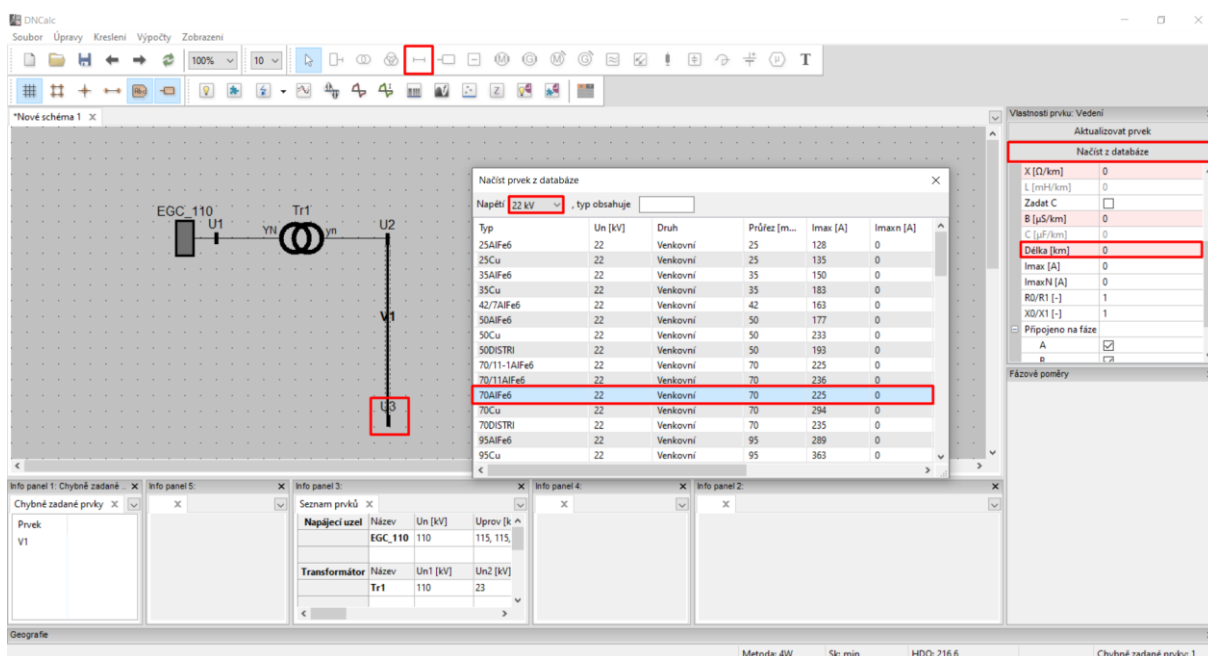
Obr. 3.3.1-1 DNCalc-Modelování napájecího uzlu

Nyní potřebujeme napětí 110kV snížit na hladinu 22kV přidáním transformátoru do schématu a to provedeme, tak že klikneme na uzel U1 ve vrchní liště „Prvků“ se nám zpřístupní možnost kreslení prvků sítě, vybereme transformátor dle obr. 3.31-2 a klikneme libovolně do pole pracovní plochy, přičemž uzel U1 je primární stranou transformátoru a místo, kde klikneme se objeví uzel U2, jako sekundární strana. Poté klikneme na prvek a v pravém rohu se objeví záložka „Vlastnosti prvku“, zvolíme znovu možnost „Načíst z databáze“. V tabulce změníme hladinu napětí na 110kV a zvolíme transformátor s kódovým označením 8 ERH 31 M-O s výkonem 25MVA.



Obr. 3.3.1-2 DNCalc-Modelování transformátoru

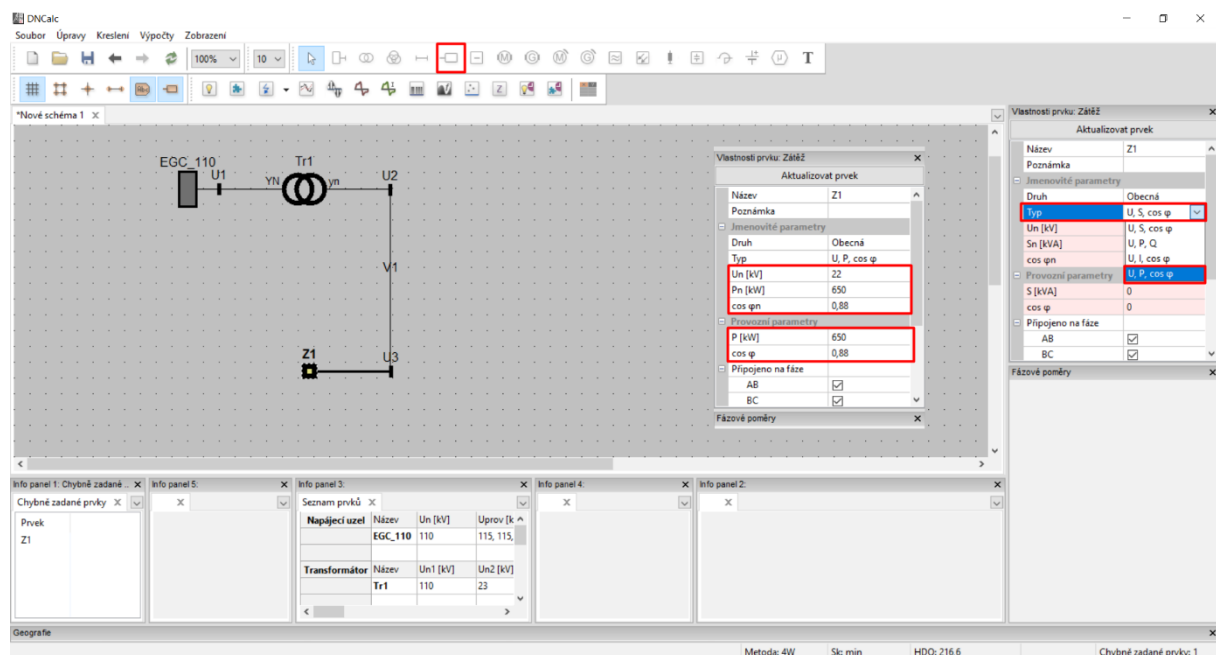
Úseky vedení přidáme tak, že klikneme na uzel U2 a ve vrchní liště prvků vybereme „vedení“ poté klikneme do prázdného pole, kde se nám vytvoří uzel U3. Klikneme na vedení a v tabulce „Vlastnosti prvků“, která se zobrazila po pravé straně, zvolíme znovu „Načíst z databáze“. Zkontrolujeme jsi, zda máme správně zvolenou hladinu napětí a vybereme typ vedení 70AlFe6 (Dvakrát poklepeme pravým tlačítkem). Posledním parametrem, který musíme zadat je délka vedení. Parametry vedení i ostatních prvků lze zadat ručně, ale pro potřeby výuky využijeme typové hodnoty.



Obr. 3.3.1-3 DNCalc-Modelování vedení

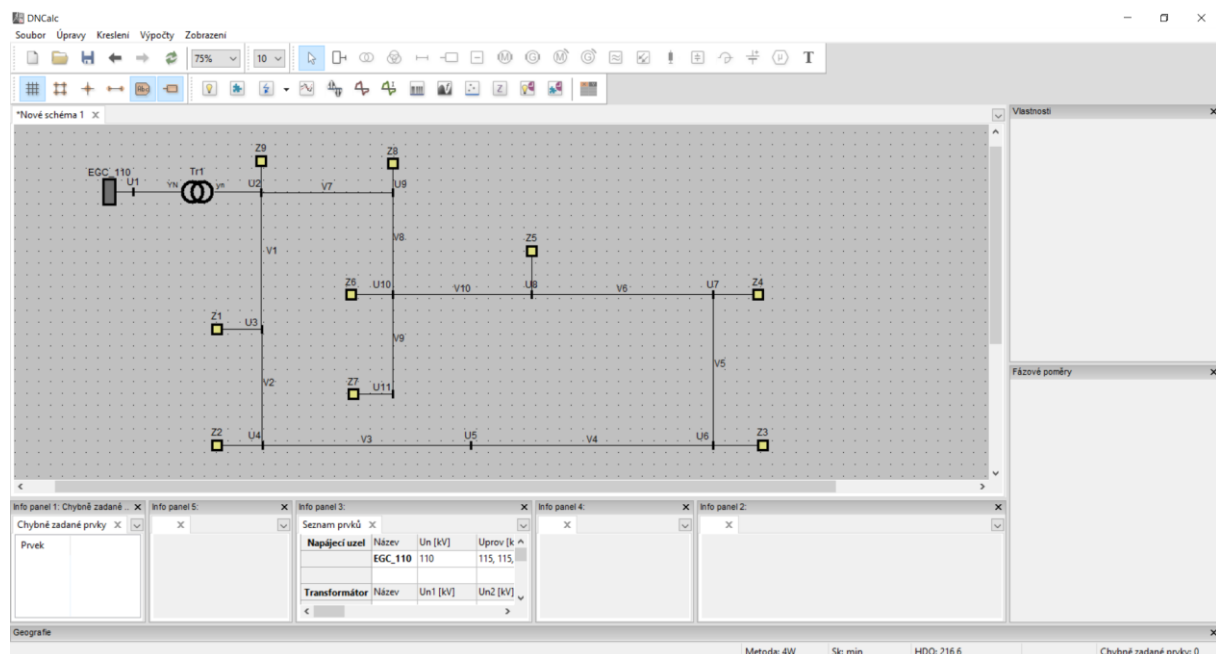
Pro vložení zátěže klikneme na uzel U3 a v liště prvků zvolíme „Zátěž“, znovu klikneme do prázdného pole. Prvek se zobrazí ve schématu. Označíme jej a v tabulce „Vlastnosti prvků“ v kolonce typ, změníme z U,S, cosφ na U,P, cosφ. Dosadíme zadané hodnoty, za U_n dosadíme 22kV, $P_n = 650\text{kW}$,

$\cos\phi = 0,88$. Za provozní parametry dosadíme to stejné neboť předpokládáme nejideálnější podmínky odběru elektrické energie.



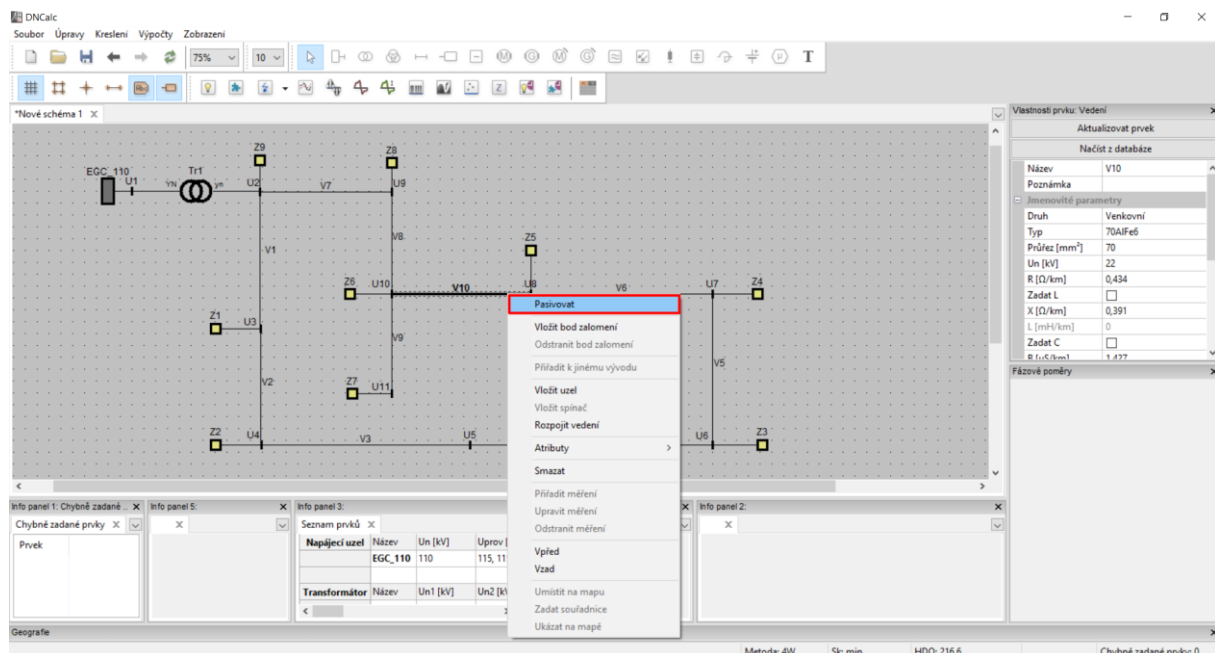
Obr. 3.3.1-4 DNCalc-Modelování zátěže

Tímto způsobem nakreslíme i zbytek úseků vedení a zátěže, a to včetně záložního vedení. Výsledek bude vypadat nějak takto:



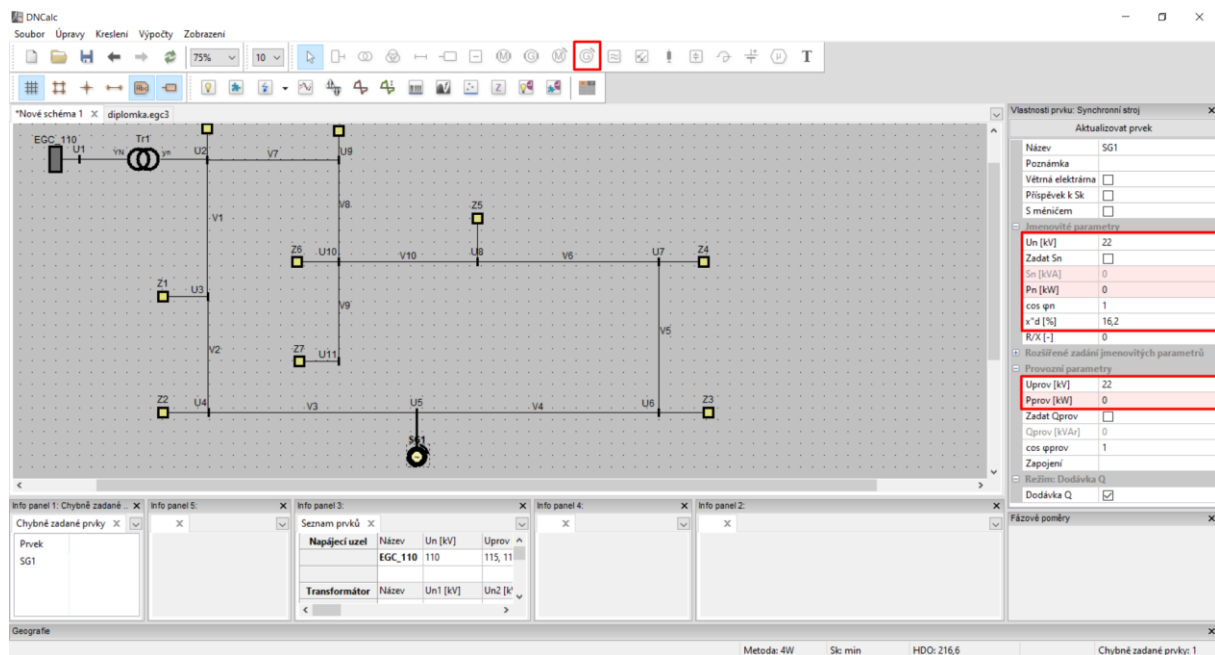
Obr. 3.3.1-5 DNCalc-Modelování-Výsledek

Záložní vedení potřebujeme odpojit, a to uděláme tak, že na toto vedení klikneme pravým tlačítkem myši a vybereme možnost „Pasivovat“, vedení po výběru této možnosti zbělá a program jej při výpočtu bude ignorovat.



Obr. 3.3.1-6 DNCalc-Modelování záložního vedení

Jako poslední krok vložíme synchronní generátor. Označíme uzel U5, v liště prvků zvolíme „synchronní generátor“ a klikneme na pracovní plochu. Do tabulky „vlastnosti prvku“ po pravé straně doplníme parametry generátoru. $U_n = 22\text{kV}$, $\cos\phi=1$, Údaj P_n , P_{prov} není zadáný, jelikož se jedná o libovolnou hodnotu, kterou bude za úkol zjistit. Subtranzientní reaktanci v podélné ose x'_d volíme 16,2 %. Synchronní generátor můžeme prozatím „Pasivovat“ neboť první výpočet provedeme bez přispění tohoto zdroje.



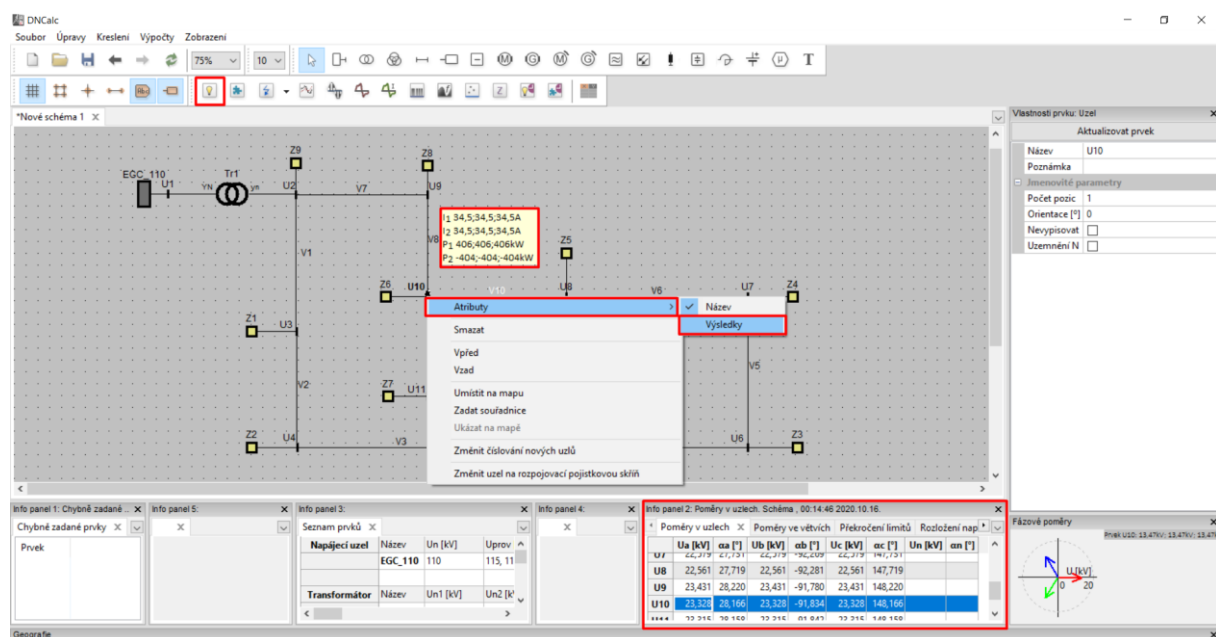
Obr. 3.3.1-7 DNCalc-Modelování synchronního generátoru

3.3.2 Výpočet a vypracování zadané úlohy v programu DNCalc

3.3.3 Parametry sítě

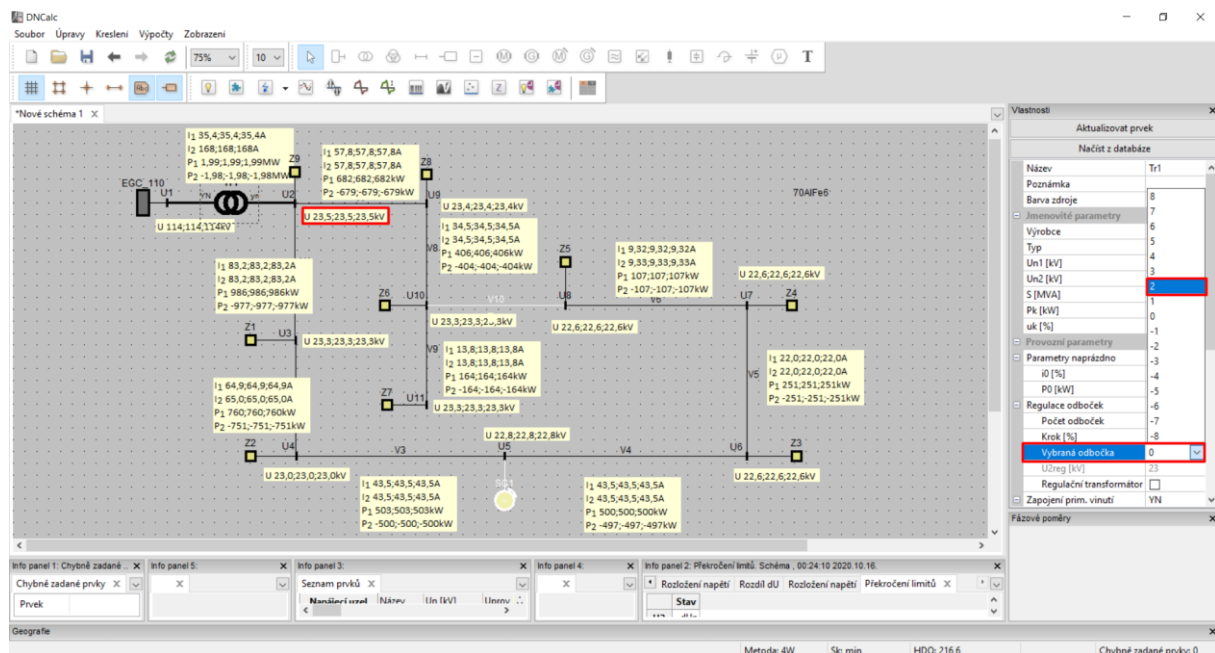
- a) V programu DNCalc vypočtete ustálený chod sítě s odpojeným zdrojem a záložním vedením. V tabulce zobrazte úbytky napětí ve všech uzlech sítě a procentní zatížení všech prvků sítě (tj. úseky vedení, transformátor,..)

V liště výpočtů klikneme na „Chod sítě“, to spustí výpočet a výsledky se nám ukážou vpravo dole v sekci „Info panel 2“. Výsledky lze zobrazit i graficky a to tak, že klikneme na prvek sítě (například uzel vedení) pravým tlačítkem myši, dále vybereme atributy → výsledky.



Obr. 3.3.3-1 DNCalc-Výpočet-Atributy

Výsledek můžeme vidět na obr. 3.3.2-2. Jelikož napětí na výstupu napájecího transformátoru je příliš vysoké, je zde namístě regulovat transformátor. Klikneme levým tlačítkem myši na trafo a v záložce provozní parametry změníme vybranou odbočku z „0“ na „2“.



Obr. 3.3.3-2 DNCalc-Výpočet-Grafické zobrazení

Po výpočtu si vyexportujeme výsledky do excelu pro přehlednější zpracování. Export lze provést buď tak, že celý soubor uložíme do souboru .csv nebo .xml, to provedeme takto: klikneme na záložku „Soubory“ a poté na „Export“. V excelu pak stačí tyto soubory nahrát jako datové soubory. Druhá možnost méně zdoluhavá je označit tabulku v „info panelu 2“, poté stisknout ctrl+c a v excelu ctrl+v. Lze také zkopírovat všechny hodnoty daného výpočtu, tak že klikneme na libovolnou záložku v „info panelu2“ pravým tlačítkem myši a zvolíme „kopírovat“.

Tab. 3.3.3-1 Úbytky napětí v uzlech při odpojeném záložním vedení a odpojeném synchronním generátoru

Poměry v uzlech									
	Ua [kV]	α [°]	Ub [kV]	α [°]	Uc [kV]	α [°]	U [kV]	ΔU [kV]	ΔU [%]
U1	114,4	29,646	114,398	-90,354	114,398	149,647	114,398	0	
U2	22,608	28,166	22,608	-91,834	22,608	148,166	22,608	0	0
U3	22,35	28,018	22,35	-91,982	22,35	148,018	22,35	0,258	1,141189
U4	22,015	27,826	22,015	-92,174	22,015	147,826	22,015	0,593	2,622965
U5	21,835	27,721	21,835	-92,279	21,835	147,721	21,835	0,773	3,419144
U6	21,656	27,614	21,656	-92,386	21,656	147,614	21,656	0,952	4,210899
U7	21,588	27,572	21,588	-92,428	21,588	147,572	21,588	1,02	4,511677
U8	21,568	27,56	21,568	-92,44	21,568	147,56	21,568	1,04	4,600142
U9	22,489	28,099	22,489	-91,901	22,489	148,099	22,489	0,119	0,526362
U10	22,382	28,04	22,382	-91,96	22,382	148,04	22,382	0,226	0,999646
U11	22,368	28,031	22,368	-91,969	22,368	148,031	22,368	0,24	1,061571

Předchozí tabulka, která zobrazuje napěťové poměry v uzlech, respektive úbytky napětí, je jedním z výstupů výpočtu chodu sítě programu DNCalc. První sloupec tabulky představuje jednotlivé uzly sítě, druhý až sedmý sloupec pak představují velikosti sdruženého napětí, včetně jejich fázového natočení. V předposledním sloupci zprava je vyčíslen úbytek napětí, tedy rozdíl napětí jednotlivých uzlů od uzlu napájecího, zde uzel U2. V posledním sloupci je pak procentní vyjádření úbytku napětí.

Z tab. 3.3.2-1 vidíme, že největší úbytek je na uzlu U8 4,6 %, který se nachází na konci hlavní větve. Úbytek napětí nepřekračuje dovolenou hranici a to 5 %.

V tab. 3.3.2-2 vidíme poměry v transformátoru, tyto hodnoty jsou součástí výstupu chodu sítě, poměry ve větvích. My si to ale v excelu oddělili pro lepší přehled.

Tab. 3.3.3-2 Zatížení transformátoru při odpojeném záložním vedení a odpojeném synchronním generátoru

Poměry v transformátoru										
	Uzel	Ia [A]	α_a [°]	Ib [A]	α_b [°]	Ic [A]	α_c [°]	Istř [A]	In [A]	Iz [%]
Tr1	U1	35,457	-32,018	35,457	-152,02	35,457	87,982	35,457	131	27,0664

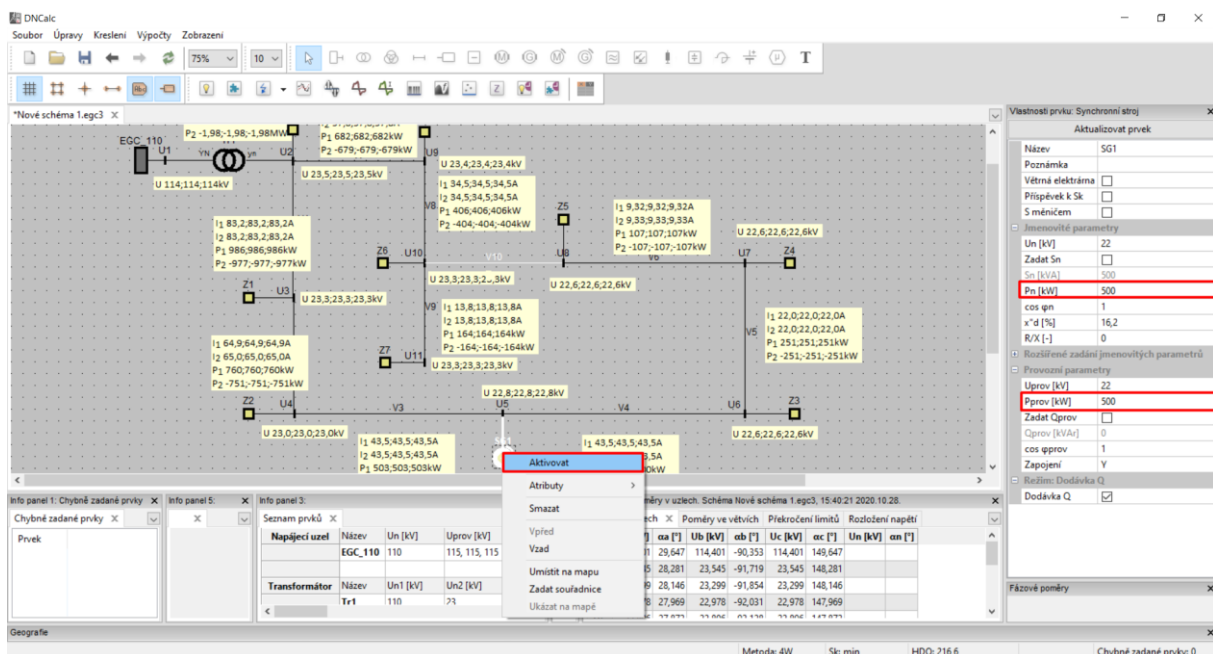
V tab. 3.3.2-3 máme poměry ve větvích, tedy zatížení jednotlivých úseků vedení. V prvním sloupci jsou znázorněná jednotlivá vedení, dále to stejné co v předchozí tabulce, ve třetím sloupci zprava je střední hodnota proudu, toto už není výstupem programu DNCalc, ale vypočetli jsme to jako aritmetický průměr protékajících proudů v jednotlivých fázích. V druhém sloupci zprava je maximální hodnota proudu, která může vedením protékat, tuto hodnotu najdeme v tabulce parametrech sítě. Poslední sloupec již znázorňuje procentní zatížení jednotlivých úseků vedení.

Tab. 3.3.3-3 Zatížení jednotlivých vedení při odpojeném záložním vedení a odpojeném synchronním generátoru

Poměry ve větvích										
	Uzel	Ia [A]	α_a [°]	Ib [A]	α_b [°]	Ic [A]	α_c [°]	Istř [A]	I _{max} [A]	Iz [%]
V1	U2	86,939	-31,285	86,939	-151,29	86,939	88,638	86,939	225	38,63956
	U3	86,952	148,699	86,952	28,699	86,952	-91,377	86,952	225	38,64533
V2	U3	67,875	-31,571	67,875	-151,57	67,875	88,354	67,875	225	30,16667
	U4	67,898	148,395	67,898	28,395	67,898	-91,678	67,898	225	30,17689
V3	U4	45,501	-31,55	45,501	-151,55	45,501	88,362	45,501	225	20,22267
	U5	45,518	148,41	45,518	28,41	45,518	-91,675	45,518	225	20,23022
V4	U5	45,518	-31,59	45,518	-151,59	45,518	88,325	45,518	225	20,23022
	U6	45,536	148,371	45,536	28,371	45,536	-91,712	45,536	225	20,23822
V5	U6	22,982	-31,337	22,982	-151,34	22,982	88,599	22,982	225	10,21422
	U7	22,995	148,605	22,995	28,605	22,995	-91,459	22,995	225	10,22
V6	U7	9,748	-30,614	9,748	-150,61	9,748	89,321	9,748	225	4,332444
	U8	9,764	149,202	9,764	29,202	9,764	-90,862	9,764	225	4,339556
V7	U2	60,206	-31,538	60,206	-151,54	60,206	88,428	60,206	225	26,75822
	U9	60,225	148,432	60,225	28,432	60,225	-91,603	60,225	225	26,76667
V8	U9	35,998	-31,653	35,998	-151,65	35,998	88,312	35,998	225	15,99911
	U10	36,012	148,308	36,012	28,308	36,012	-91,726	36,012	225	16,00533
V9	U10	14,393	-30,262	14,393	-150,26	14,393	89,704	14,393	225	6,396889
	U11	14,402	149,674	14,402	29,674	14,402	-90,361	14,402	225	6,400889

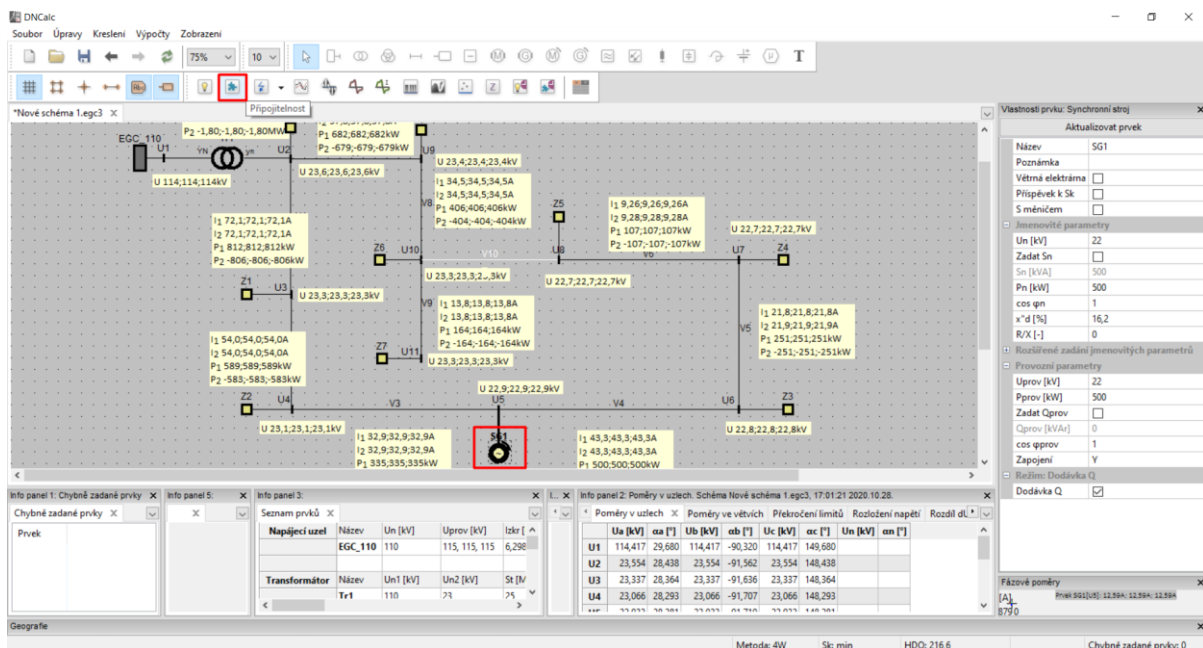
b) Proveďte výpočet připojitelnosti s připojeným zdrojem a určete limitní činný výkon zdroje. A to tak, aby v celé síti nedošlo ke změně napětí o více než 2 %.

Nejdříve klikneme pravým tlačítkem myši na synchronní generátor ve schématu a zvolíme možnost „Aktivovat“, zároveň v pravém sloupci „Vlastnosti prvku“ doplníme údaj o výkonu generátoru. Jako počáteční hodnotu zvolíme 500kW



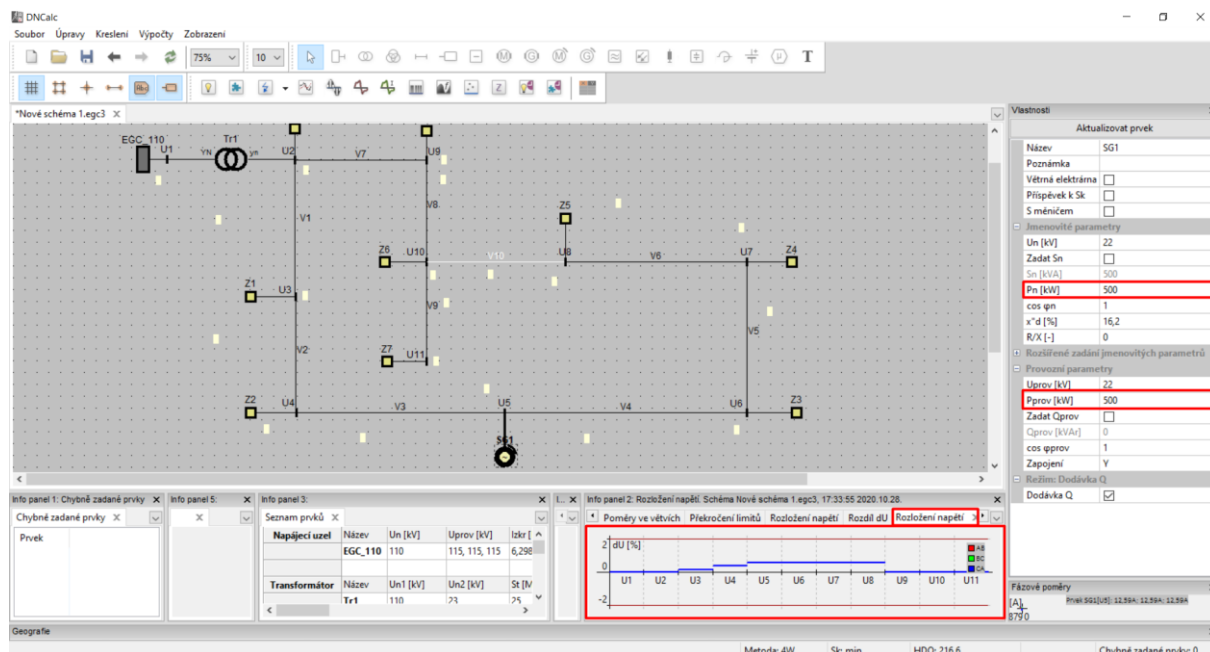
Obr. 3.3.3-3 DNCalc-Výpočet-aktivování synchronního generátoru

Poté klikneme levým tlačítkem myši na synchronní generátor, ten se označí a provedeme výpočet připojitelnosti a to tak, že klikneme na v horní liště na „Připojitelnost“ viz obrázek, a nebo klikneme na záložku „Výpočet“ a poté vybereme „Připojitelnost“.



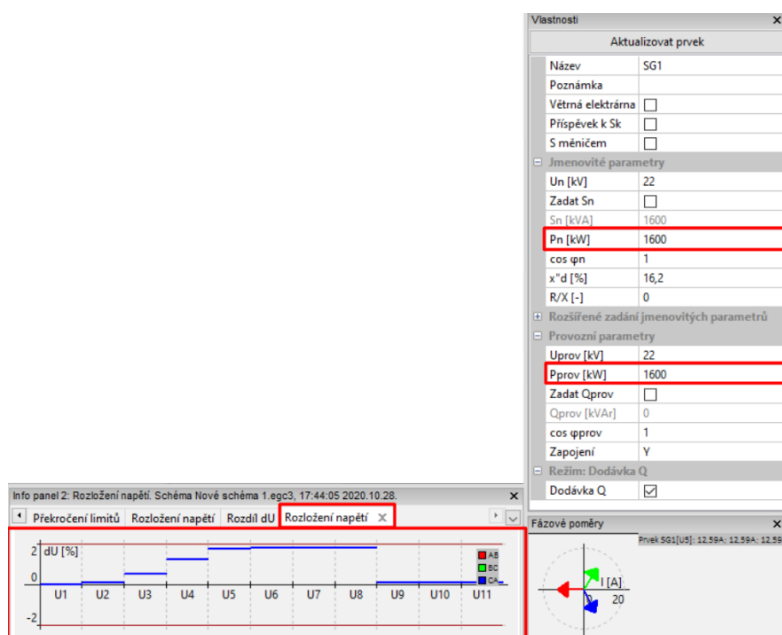
Obr. 3.3.3-4 DNCalc-Výpočet připojitelnosti

Výsledky se zobrazí v „Info panelu 2“ vpravo dole. V záložce „Rozdíl dU“ dostaneme hodnoty poklesu napětí v tabulkovém uspořádání. Ve sloupcích jsou hodnoty rozdílů napětí před připojením a po připojení synchronního generátoru do sítě, a pak jejich rozdíl. V další záložce „Rozložení napětí“ najdeme grafické znázornění změny napětí v síti se znázorněnou hranicí 2 %, která vyplývá z podmínek připojitelnosti.



Obr. 3.3.3-5 DNCalc-Výpočet-Podmínky připojitelnosti

Limitní výkon tedy můžeme zjistit jednoduše tak, že změníme výkon generátoru a znovu provedeme výpočet připojitelnosti, dokud se nepřiblížíme k hranici 2 %. V našem zadání nám vychází limitní výkon 1,6 MW.



Obr. 3.3.3-6 DNCalc-Výpočet-Změna výkonu synchronního generátoru

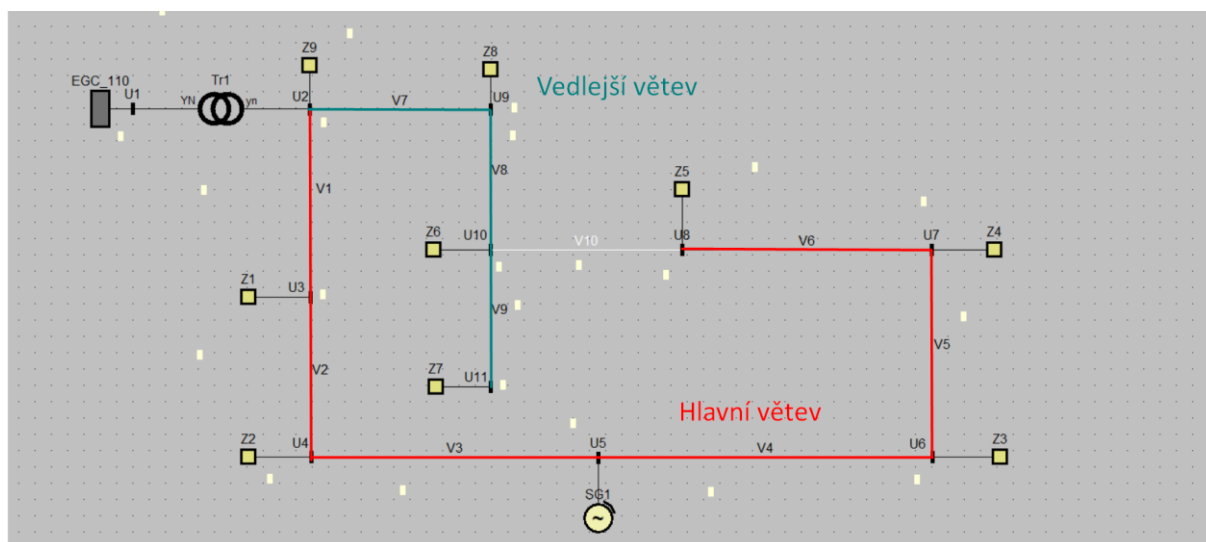
3.3.4 Provozní stavy a výpočet připojitelnosti

c) Zkonstruuje grafickou závislost $U=f(l)$. Graf doplňte úsečkou, která znázorňuje dovolený úbytek napětí (5 % z U na začátku vedení). A to pro:

- Síť s odpojeným zdrojem a záložním vedením
- Síť s odpojeným zdrojem a připojeným záložním vedením
- Síť s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením
- Síť s připojeným zdrojem a záložním vedením

Dále po připojení zdroje s odpojeným záložním vedením zkonstruuje grafickou závislost $\Delta U_{\%} = f(l)$ s doplněním přímky znázorňující podmínky připojení do distribuční sítě (2 % z U)

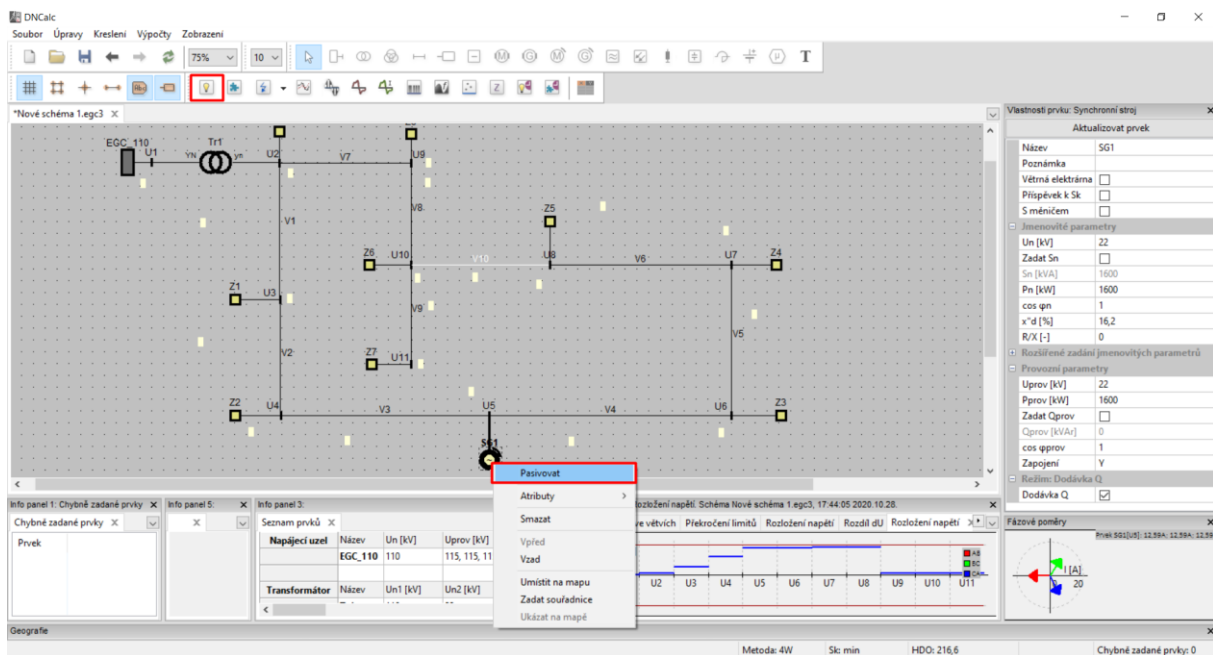
Jelikož konstruuje závislost poklesu napětí v závislosti na délce od napájecího transformátoru a naše síť obsahuje odbočku typu „T“, budeme muset naši síť rozdělit na dvě větve (úseky). Hlavní větev a vedlejší větev.



Obr. 3.3.4-1 DNCalc-Rozdělení úseků vedení

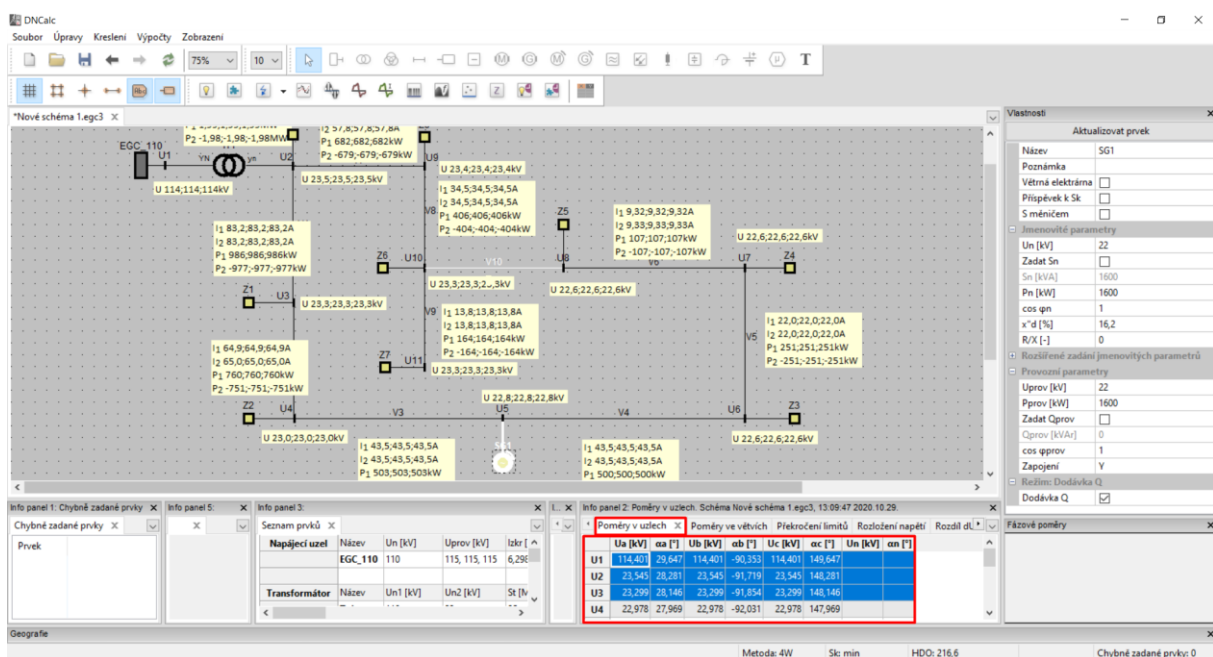
Hlavní větev se skládá z uzlů U2-U3-U4-U5-U6-U7-U8 a vedlejší větev z uzlů U2-U9-U10-U11.

V Předchozím úkolu jsme aktivovali synchronní generátor a jako první měření budeme provádět výpočet ustáleného chodu sítě pro odpojené záložní vedení a odpojený synchronní generátor. Klikneme tedy pravým tlačítkem myši na synchronní generátor ve schématu a zvolíme možnost „Pasivovat“. Prvek se zabarví do šeda. Dále provedeme výpočet ustáleného chodu sítě a to tak, že buďto v liště klikneme na ikonu „Chod sítě“, a nebo v záložce „Výpočty“ vybereme „Chod sítě“.



Obr. 3.3.4-2 DNCalc-Výpočet ustáleného chodu sítě s odpojeným záložním vedením a odpojeným synchronním generátorem

Výsledky, které se zobrazí vpravo dole v „Infopanelu 2“ vyexportujeme do excelu. To uděláme tak, že klikneme pravým tlačítkem myši na záložku „Poměry v uzlech“ a vybereme možnost „Kopírovat výsledky“. Nebo jednodušeji označíme buňky které chceme zkopírovat (respektive celou tabulku) a použijeme klávesovou zkratku „CTRL-C“ a v excelu data zase vložíme pomocí zkratky CTRL-V“



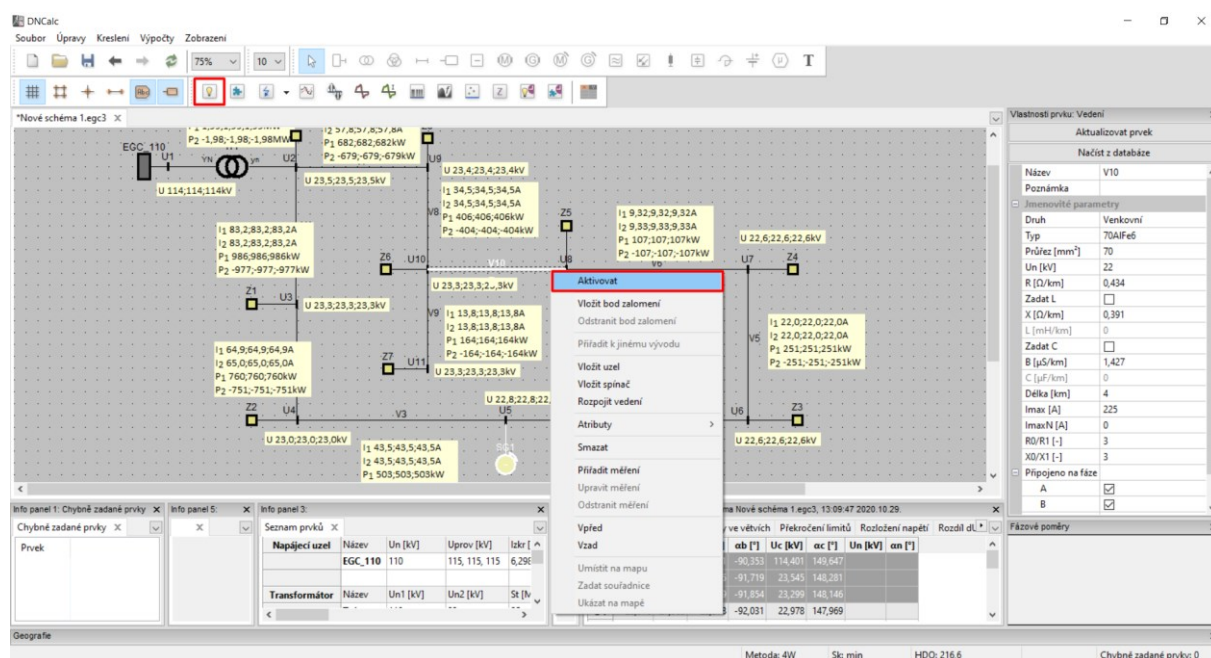
Obr. 3.3.4-3 DNCalc-Grafické znázornění výsledků a jejich export

První sloupec tab. 3.3.2-4 rozlišuje hlavní a vedlejší vedení, další sloupec znázorňuje uzly, které do tohoto vedení patří. Třetí až osmý sloupec obsahuje velikosti napětí v jednotlivých fázích uzlu a jejich fázové natočení. V předposledním sloupci najdete aritmetický průměr hodnot napětí a v posledním sloupci je vzdálenost daného uzlu od napájecího uzlu, tedy uzlu U2.

Tab. 3.3.4-1 Napěťové poměry v síti s odpojeným záložním vedením a odpojeným synchronním generátorem

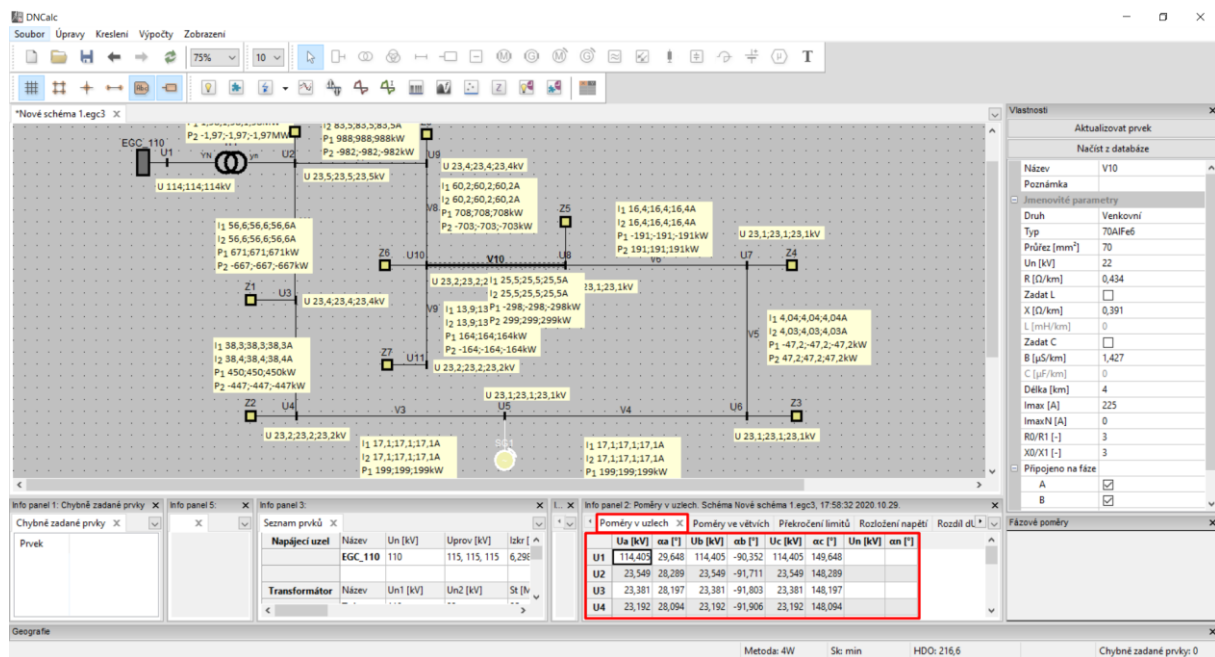
		Poměry v uzlech							
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,398	29,646	114,398	-90,354	114,398	149,647	114,398	
	U2	22,608	28,166	22,608	-91,834	22,608	148,166	22,608	0
	U3	22,35	28,018	22,35	-91,982	22,35	148,018	22,35	3
	U4	22,015	27,826	22,015	-92,174	22,015	147,826	22,015	8
	U5	21,835	27,721	21,835	-92,279	21,835	147,721	21,835	12
	U6	21,656	27,614	21,656	-92,386	21,656	147,614	21,656	17
	U7	21,588	27,572	21,588	-92,428	21,588	147,572	21,588	20
	U8	21,568	27,56	21,568	-92,44	21,568	147,56	21,568	22
Vedlejší větev	U2	22,608	28,166	22,608	-91,834	22,608	148,166	22,608	0
	U9	22,489	28,099	22,489	-91,901	22,489	148,099	22,489	2
	U10	22,382	28,04	22,382	-91,96	22,382	148,04	22,382	5
	U11	22,368	28,031	22,368	-91,969	22,368	148,031	22,368	6

Toto bylo pro zadanou síť s odpojeným záložním vedením a synchronním generátorem, nyní provedeme výpočet pro síť s odpojeným zdrojem a připojeným záložním vedením. Klikneme pravým tlačítkem myši na záložní vedení a zvolíme možnost „Aktivovat“, poté spustíme znovu výpočet „Chod sítě“.



Obr. 3.3.4-4 DNCalc-Zapojení záložního vedení

Výsledky znovu vyexportujeme do tabulkového kalkulátoru MS Excel viz předchozí krok a zobrazíme je v tabulkové podobě.



Obr. 3.3.4-5 DNCalc-Výpočet chodu sítě-Výsledky

Tab. 3.3.4-2 Napěťové poměry v síti s připojeným záložním vedením a odpojeným synchronním generátorem

		Poměry v uzlech							
		Ua [kV]	αa [°]	Ub [kV]	αb [°]	Uc [kV]	αc [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,403	29,648	114,403	-90,352	114,403	149,648	114,403	
	U2	22,612	28,175	22,612	-91,825	22,612	148,175	22,612	0
	U3	22,438	28,074	22,438	-91,926	22,438	148,074	22,438	3
	U4	22,241	27,962	22,241	-92,038	22,241	147,962	22,241	8
	U5	22,171	27,922	22,171	-92,078	22,171	147,922	22,171	12
	U6	22,101	27,882	22,101	-92,118	22,101	147,882	22,101	17
	U7	22,114	27,889	22,114	-92,111	22,114	147,889	22,114	20
	U8	22,148	27,909	22,148	-92,091	22,148	147,909	22,148	22
Vedlejší větev	U2	22,612	28,175	22,612	-91,825	22,612	148,175	22,612	0
	U9	22,44	28,078	22,44	-91,922	22,44	148,078	22,44	2
	U10	22,253	27,972	22,253	-92,028	22,253	147,972	22,253	5
	U11	22,239	27,963	22,239	-92,037	22,239	147,963	22,239	6

Pro síť s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením provedeme výpočet tak, že klikneme pravým tlačítkem myši na záložní vedení a zvolíme možnost „Pasivovat“, zároveň klikneme i na synchronní generátor a zvolíme možnost „Aktivovat“. S touto konfigurací provedeme znovu výpočet chodu sítě a výsledky opět zobrazíme v tabulkové podobě. Postupujeme stejně jako v předchozím případě.

Tab. 3.3.4-3 Napěťové poměry v síti s odpojeným záložním vedením a připojeným synchronním generátorem

		Poměry v uzlech							
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,448	29,753	114,448	-90,247	114,448	149,753	114,448	
	U2	22,635	28,696	22,635	-91,304	22,635	148,696	22,635	0
	U3	22,475	28,761	22,475	-91,239	22,475	148,761	22,475	3
	U4	22,301	28,93	22,301	-91,07	22,301	148,93	22,301	8
	U5	22,25	29,116	22,25	-90,884	22,25	149,116	22,25	12
	U6	22,073	29,013	22,073	-90,987	22,073	149,013	22,073	17
	U7	22,007	28,973	22,007	-91,027	22,007	148,973	22,007	20
	U8	21,988	28,961	21,988	-91,039	21,988	148,961	21,988	22
Vedlejší větev	U2	22,635	28,696	22,635	-91,304	22,635	148,696	22,635	0
	U9	22,516	28,63	22,516	-91,37	22,516	148,63	22,516	2
	U10	22,41	28,571	22,41	-91,429	22,41	148,571	22,41	5
	U11	22,395	28,562	22,395	-91,438	22,395	148,562	22,395	6

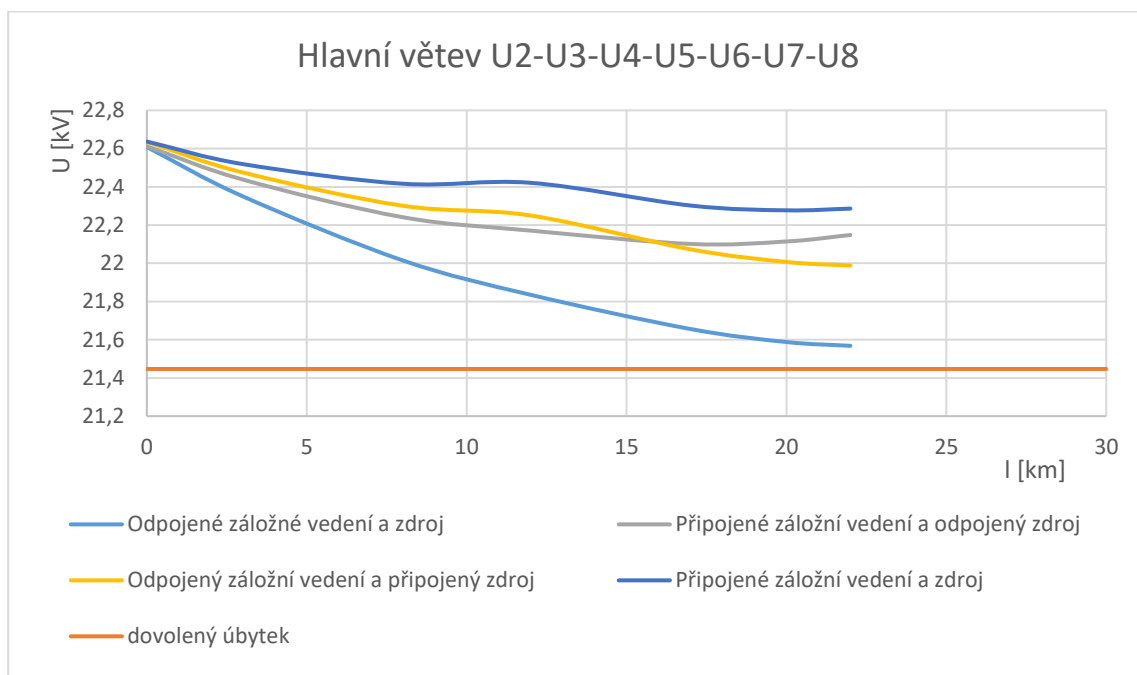
Stejný postup zvolíme pro výpočet ustáleného chodu sítě pro poslední možnost, a to s připojeným zdrojem a připojeným záložním vedením. Klikneme pravým tlačítkem myši na záložní vedení a zvolíme možnost „Aktivovat“, poté provedeme výpočet chodu sítě a výsledky vyexportujeme.

Tab. 3.3.4-4 Napěťové poměry v síti s připojeným záložním vedením a připojeným synchronním generátorem

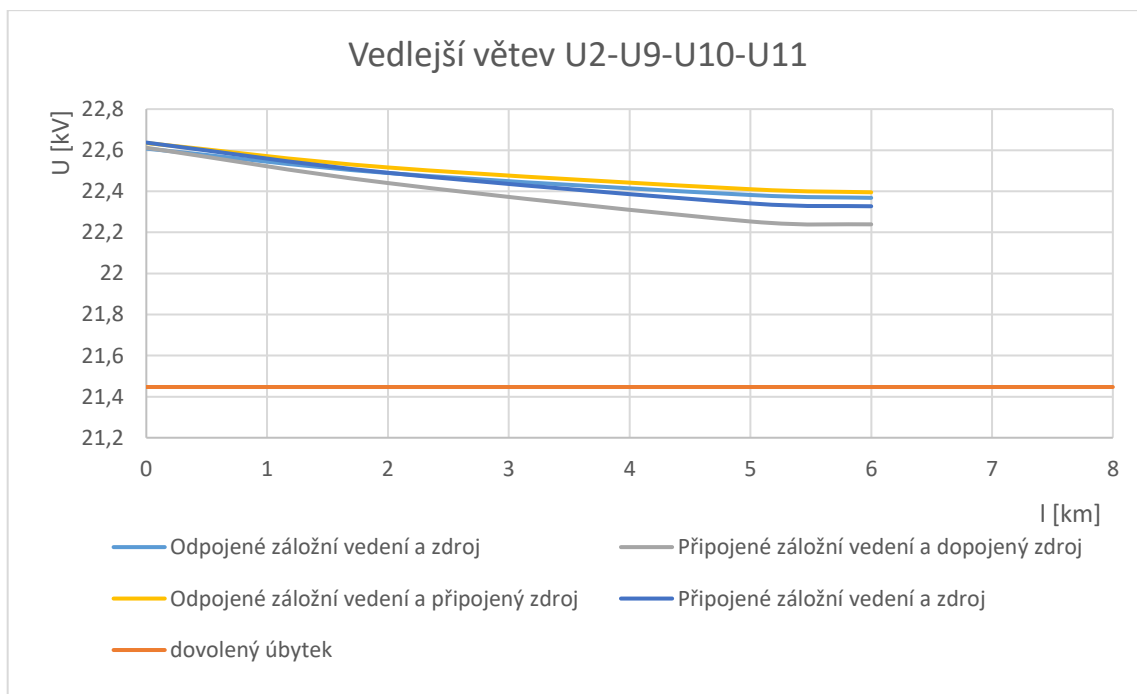
		Poměry v uzlech							
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,45	29,754	114,45	-90,246	114,45	149,754	114,45	
	U2	22,637	28,698	22,637	-91,302	22,637	148,698	22,637	0
	U3	22,519	28,725	22,519	-91,275	22,519	148,725	22,519	3
	U4	22,416	28,828	22,416	-91,172	22,416	148,828	22,416	8
	U5	22,421	28,96	22,421	-91,04	22,421	148,96	22,421	12
	U6	22,302	28,807	22,302	-91,193	22,302	148,807	22,302	17
	U7	22,277	28,728	22,277	-91,272	22,277	148,728	22,277	20
	U8	22,286	28,69	22,286	-91,31	22,286	148,69	22,286	22
Vedlejší větev	U2	22,637	28,698	22,637	-91,302	22,637	148,698	22,637	0
	U9	22,49	28,658	22,49	-91,342	22,49	148,658	22,49	2
	U10	22,341	28,637	22,341	-91,363	22,341	148,637	22,341	5
	U11	22,327	28,628	22,327	-91,372	22,327	148,628	22,327	6

Z tabulek 3.3.2-4 až 3.3.2-7 vytvoříme grafickou závislost $U=f(l)$. K tomu nám poslouží poslední dva sloupce tabulek, kdy si oddělíme hlavní a vedlejší větev tak, že každou zobrazíme na samostatný graf. Do grafu doplníme přímkou, která znázorňuje maximální dovolený úbytek napětí, což je 5 % z napětí v napájecím uzlu (U2). Z grafů na obr. 3.3.2-12 a obr. 3.3.2-13 vidíme, že největší pokles napětí v závislosti na délce vedení dochází v hlavní větvi, kdy největší úbytek nastává při odpojeném záložním vedením a odpojením zdroji. Pokud připojíme zdroj, ale záložní vedení necháme odpojené, dojde ke

snížení úbytku napětí na konci hlavní větve. Zlepší se napěťové poměry v síti. Pokud odpojíme zdroj a připojíme záložní vedení, síť již není paprskovou sítí, ale částečně okružní. Změní se toky výkonů, což má za následek změnu místa maximálního úbytku napětí a také se sníží tento úbytek. V poslední variantě, připojení zdroje a záložního vedení, dojde k výraznému zlepšení napěťových poměrů v síti.



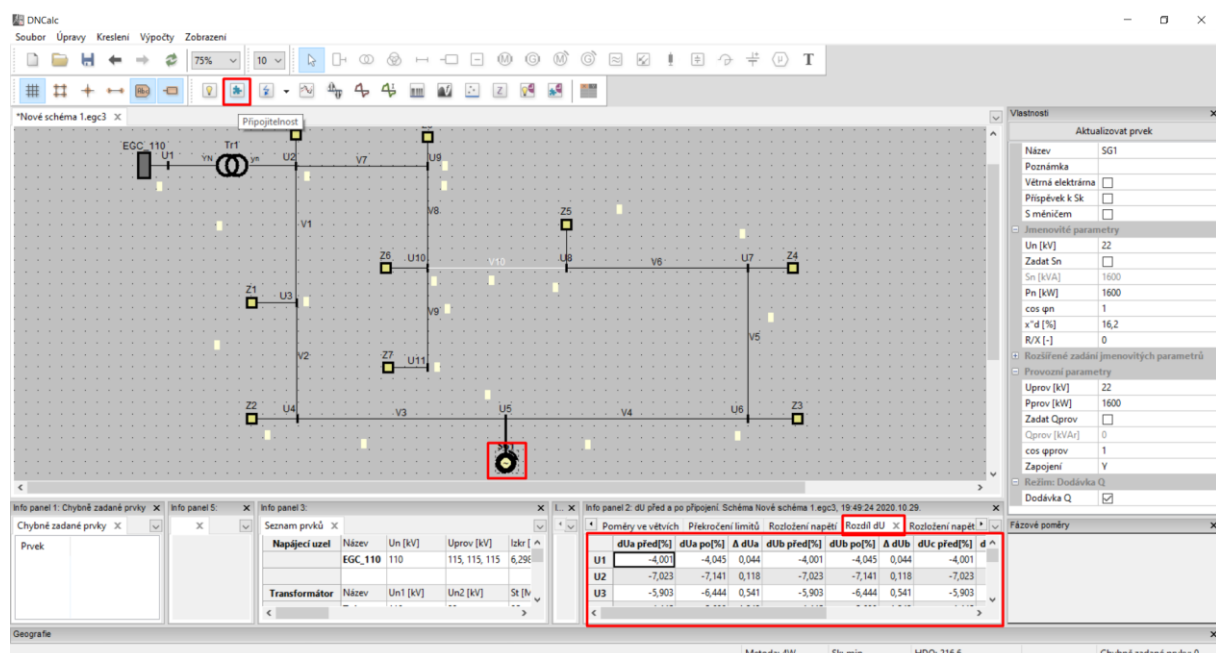
Obr. 3.3.4-6 Grafická závislost $U=f(l)$ v hlavní větvi



Obr. 3.3.4-7 Grafická závislost $U=f(l)$ ve vedlejší větvi

Nyní provedeme výpočet připojitelnosti pro stav, kdy bude záložní vedení odpojené a zdroj připojený. Klikneme pravým tlačítkem myši na záložní vedení a vybereme možnost „Pasivovat“, pak klikneme pravým tlačítkem myši na synchronní generátor ve schématu a zvolíme možnost „Aktivovat“.

Označíme synchronní generátor ve schématu tak, že na něj klikneme levým tlačítkem myši a v horní liště vybereme „Připojitelnost“ nebo klikneme v záložce na „Výpočty“ a vybereme možnost „Připojitelnost“. Vypočtené hodnoty se zobrazí v „Infopanelu 2“ v dolním pravém rohu obrazovky. Vybereme záložku „Rozdíl dU“ a tyto hodnoty vyexportujeme do excelu a upravíme.



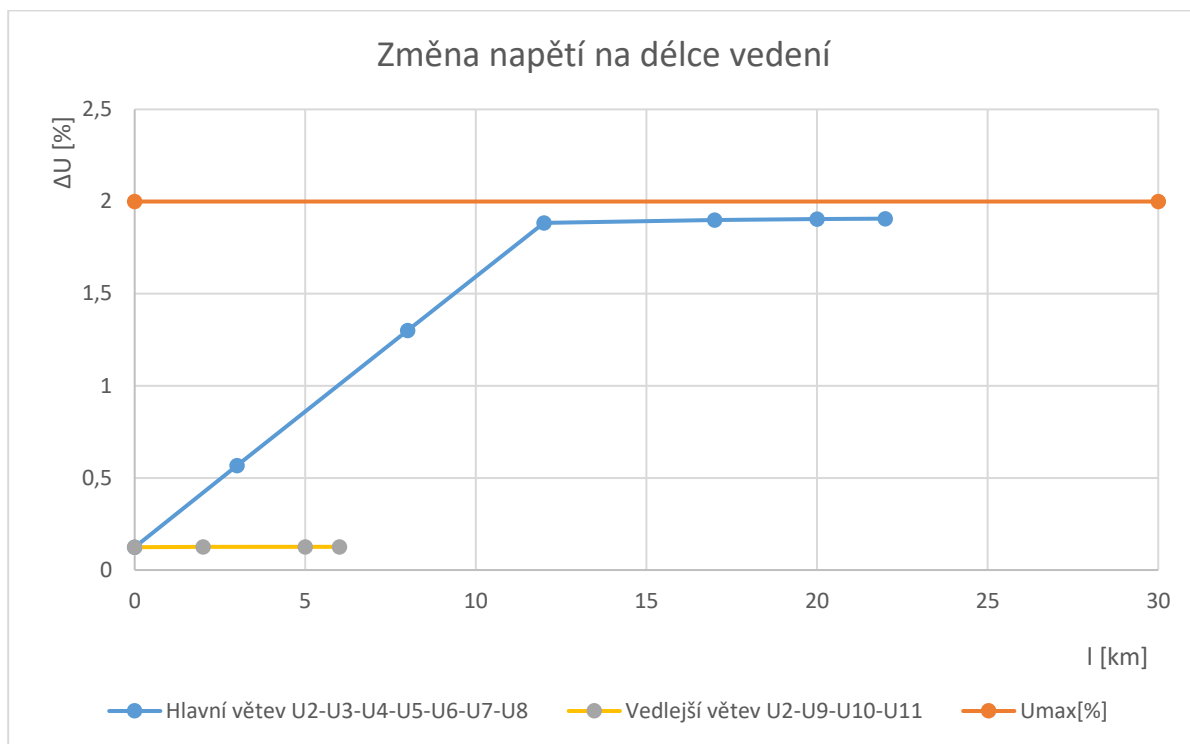
Obr. 3.3.4-8 DNCalc-Výpočet připojitelnosti synchronního generátoru a export výsledků

Tab. 3.3.4-5 Změna napětí v síti po připojení synchronního generátoru

		Rozdíl dU										
		dUa před[%]	dUa po[%]	Δ dUa	dUb před[%]	dUb po[%]	Δ dUb	dUc před[%]	dUc po[%]	Δ dUc	dU [%]	l [km]
Hlavní větev	U1	-3,998	-4,044	0,045	-3,998	-4,044	0,045	-3,998	-4,044	0,045	0,045	
	U2	-2,763	-2,887	0,124	-2,763	-2,887	0,124	-2,763	-2,887	0,124	0,124	0
	U3	-1,592	-2,159	0,567	-1,592	-2,159	0,567	-1,592	-2,159	0,567	0,567	3
	U4	-0,068	-1,369	1,301	-0,068	-1,369	1,301	-0,068	-1,369	1,301	1,301	8
	U5	0,749	-1,135	1,884	0,749	-1,135	1,884	0,749	-1,135	1,884	1,884	12
	U6	1,566	-0,334	1,899	1,566	-0,334	1,899	1,566	-0,334	1,899	1,899	17
	U7	1,875	-0,031	1,905	1,875	-0,031	1,905	1,875	-0,031	1,905	1,905	20
	U8	1,962	0,055	1,907	1,962	0,055	1,907	1,962	0,055	1,907	1,907	22
Vedlejší větev	U2	-2,763	-2,887	0,124	-2,763	-2,887	0,124	-2,763	-2,887	0,124	0,124	0
	U9	-2,222	-2,347	0,125	-2,222	-2,347	0,125	-2,222	-2,347	0,125	0,125	2
	U10	-1,736	-1,862	0,126	-1,736	-1,862	0,126	-1,736	-1,862	0,126	0,126	5
	U11	-1,672	-1,798	0,126	-1,672	-1,798	0,126	-1,672	-1,798	0,126	0,126	6

V tab. 3.3.2-8 se nachází vypočtené hodnoty po provedeném výpočtu připojitelnosti pomocí programu DNCalc. Ve třetím a čtvrtém sloupci je vyčíslena změna napětí před připojením zdroje do sítě a po připojení zdroje, pátý sloupec pak představuje změnu napětí způsobenou připojením zdroje do sítě ve fázi „a“. Tab. 3.3.2-8 dále obsahuje změnu napětí i v ostatních fázích a průměrnou změnu napětí

v síti. V předposledním sloupci najdeme procentní vyjádření změny napětí. Zde vidíme, že nikde nepřekračuje 2 %. V posledním sloupci je pak vzdálenost daného uzlu od uzlu U2, tedy uzlu napájecího. Z hodnot v posledních dvou sloupcích sestavíme graf závislosti $\Delta U_{\%}=f(l)$.

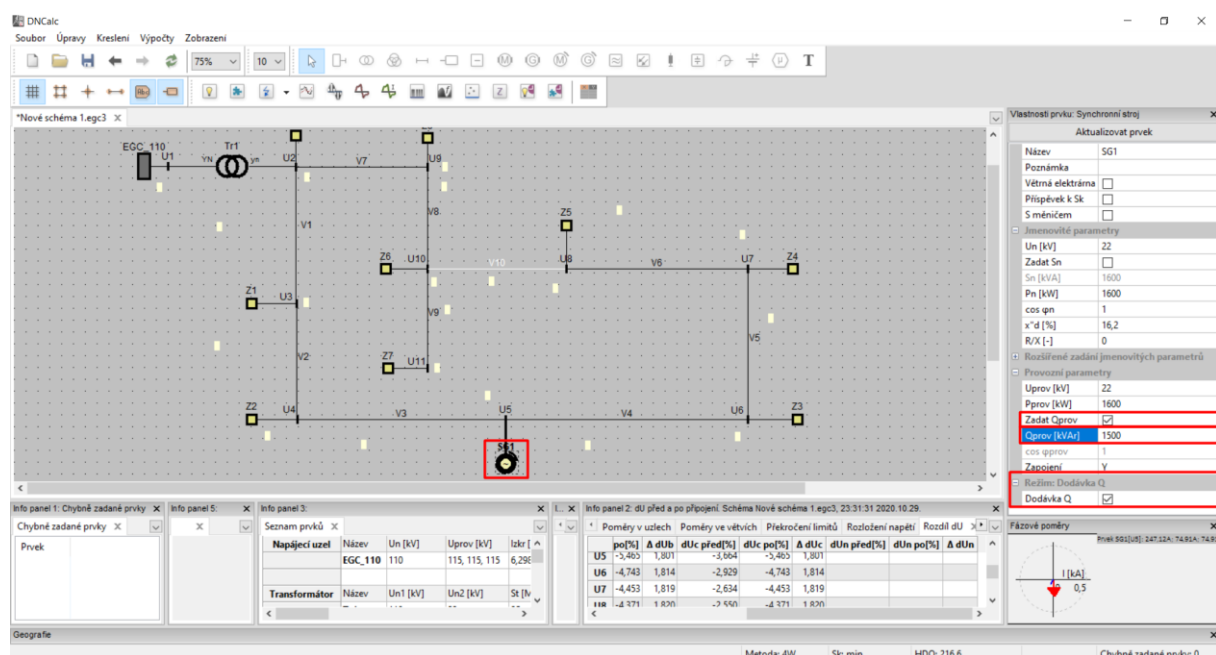


Obr. 3.3.4-9 Změna napětí v síti po připojení synchronního generátoru o výkonu 1,6 MW

3.3.5 Změna jalového výkonu

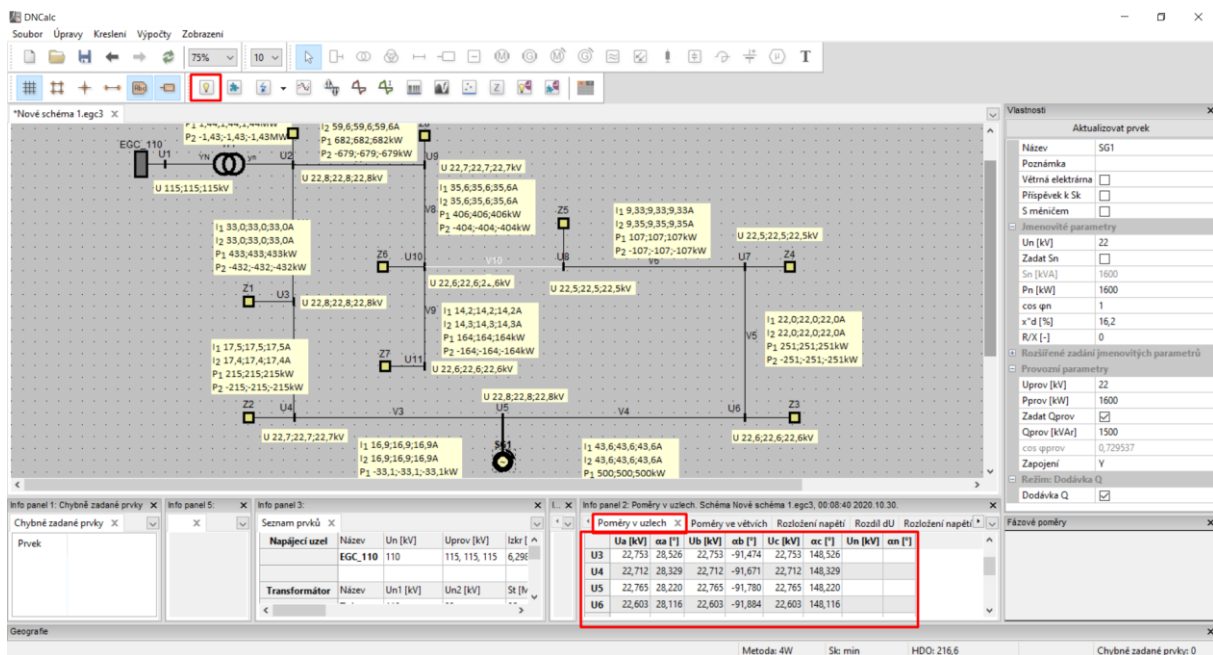
d) Proveďte výpočet ustáleného chodu sítě s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením pro různá Q zdroje při limitním výkonu. Měňte Q zdroje a vynesete grafickou závislost $U = f(I)$. Proveďte výpočet pro celkem 7 různých hodnot Q (3x kapacitní, nulovou a 3x induktivní). Dále do sloupcového grafu vynesete závislost celkových činných ztrát sítě $\Delta P = f(Q_z)$

Volba velikosti jalového výkonu je libovolná, doporučujeme však ve stovkách kVAr, aby byla vidět změna napětí. My jsme zvolili tyto hodnoty: 1500, 800 a 200 kapacitní poté pro nulovou dodávku jalového výkonu a 200, 800, 1500 induktivní. Klikneme levým tlačítkem myši na synchronní generátor ve schématu, vpravo v tabulce „Vlastnosti prvku“ zvolíme možnost „Zadat Qprov“, zpřístupní se kolonka pod ní a vyplníme hodnotu 1500 kVAr. Ještě si musíme zkontrolovat, zda má kapacitní charakter. Dole vidíme zaškrtnuté políčko „Dodávka Q“ a nad ním „Režim: Dodávka Q“ a to je správně. Kdybychom to políčko odznačili, změnil se režim na odběr, a to značí induktivní charakter jalového výkonu.



Obr. 3.3.5-1 DNCalc-Zadání jalového výkonu synchronního generátoru ve schématu

Jakmile máme zadány parametry spustíme výpočet ustáleného chodu sítě. Vyexportujeme výsledky v záložce „Poměry v uzlech“ a zobrazíme v tabulkové podobě.



Obr. 3.3.5-2 DNCalc-Výpočet chodu sítě s dodávkou jalového výkonu do sítě synchronním generátorem

Tab. 3.3.2-9 je rovněž rozdělená na hlavní větev a vedlejší větev, v druhém sloupci najdeme uzly, třetí až osmý sloupec představuje velikost napětí ve všech fázích včetně fázového natočení. Druhý sloupec zprava obsahuje průměrnou hodnotu napětí a v posledním sloupci najdeme vzdálenost daného uzlu od uzlu napájecího (U2). Pro další hodnoty postupujeme stejným postupem. Označíme synchronní generátor a změníme parametr „Qprov“ z 1500 kVAr na 800 kVAr. Tento postup opakujeme i pro hodnotu 200 kVAr kapacitních a 0kVAr. Jakmile budeme zadávat induktivní jalový výkon musíme označit kolonku „Dodávka Q“, po provedení se změní režim na odběr. Zadáme zbývající tři induktivní hodnoty a provedeme výpočet chodu sítě. Činný výkon synchronního generátoru je nastaven na hodnotu limitního výkonu po celou dobu výpočtu.

Tab. 3.3.5-1 Napěťové poměry v síti při dodávce jalového výkonu 1500 kVAr synchronním generátorem

		Pro Q = 1500 kVAr kapacitní		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	αa [°]	Ub [kV]	αb [°]	Uc [kV]	αc [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,652	29,739	114,652	-90,261	114,652	149,739	114,652	
	U2	22,833	28,678	22,833	-91,322	22,833	148,678	22,833	0
	U3	22,753	28,526	22,753	-91,474	22,753	148,526	22,753	3
	U4	22,712	28,329	22,712	-91,671	22,712	148,329	22,712	8
	U5	22,765	28,219	22,765	-91,781	22,765	148,219	22,765	12
	U6	22,593	28,121	22,593	-91,879	22,593	148,121	22,593	17
	U7	22,528	28,083	22,528	-91,918	22,528	148,083	22,528	20
	U8	22,509	28,071	22,509	-91,929	22,509	148,071	22,509	22
Vedlejší větev	U2	22,833	28,678	22,833	-91,322	22,833	148,678	22,833	0
	U9	22,716	28,613	22,716	-91,387	22,716	148,613	22,716	2
	U10	22,61	28,555	22,61	-91,445	22,61	148,555	22,61	5
	U11	22,596	28,546	22,596	-91,454	22,596	148,546	22,596	6

Tab. 3.3.5-2 Napěťové poměry v síti při dodávce jalového výkonu 800 kVar synchronním generátorem

		Pro Q = 800 kVar kapacitní		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,558	29,746	114,558	-90,254	114,558	149,746	114,558	
	U2	22,742	28,688	22,742	-91,312	22,742	148,688	22,742	0
	U3	22,625	28,636	22,625	-91,364	22,625	148,636	22,625	3
	U4	22,523	28,607	22,523	-91,393	22,523	148,607	22,523	8
	U5	22,528	28,633	22,528	-91,367	22,528	148,633	22,528	12
	U6	22,354	28,532	22,354	-91,468	22,354	148,532	22,354	17
	U7	22,288	28,493	22,288	-91,507	22,288	148,493	22,288	20
	U8	22,27	28,481	22,27	-91,519	22,27	148,481	22,27	22
Vedlejší větev	U2	22,742	28,688	22,742	-91,312	22,742	148,688	22,742	0
	U9	22,624	28,622	22,624	-91,378	22,624	148,622	22,624	2
	U10	22,518	28,564	22,518	-91,436	22,518	148,564	22,518	5
	U11	22,504	28,555	22,504	-91,445	22,504	148,555	22,504	6

Tab. 3.3.5-3 Napěťové poměry v síti při dodávce jalového výkonu 200 kVar synchronním generátorem

		Pro Q = 200 kVar kapacitní		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,476	29,751	114,476	-90,249	114,476	149,751	114,476	
	U2	22,662	28,694	22,662	-91,306	22,662	148,694	22,662	0
	U3	22,513	28,73	22,513	-91,27	22,513	148,73	22,513	3
	U4	22,357	28,849	22,357	-91,151	22,357	148,849	22,357	8
	U5	22,32	28,994	22,32	-91,006	22,32	148,994	22,32	12
	U6	22,144	28,892	22,144	-91,108	22,144	148,892	22,144	17
	U7	22,078	28,852	22,078	-91,148	22,078	148,852	22,078	20
	U8	22,059	28,84	22,059	-91,16	22,059	148,84	22,059	22
Vedlejší větev	U2	22,662	28,694	22,662	-91,306	22,662	148,694	22,662	0
	U9	22,543	28,628	22,543	-91,372	22,543	148,628	22,543	2
	U10	22,437	28,569	22,437	-91,431	22,437	148,569	22,437	5
	U11	22,423	28,56	22,423	-91,44	22,423	148,56	22,423	6

Tab. 3.3.5-4 Napěťové poměry v síti při $\cos\varphi=1$ synchronního generátoru

		Pro Q = 0 kVar		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,448	29,753	114,448	-90,247	114,448	149,753	114,448	
	U2	22,635	28,696	22,635	-91,304	22,635	148,696	22,635	0
	U3	22,475	28,761	22,475	-91,239	22,475	148,761	22,475	3
	U4	22,301	28,93	22,301	-91,07	22,301	148,93	22,301	8
	U5	22,25	29,116	22,25	-90,884	22,25	149,116	22,25	12
	U6	22,073	29,013	22,073	-90,987	22,073	149,013	22,073	17
	U7	22,007	28,973	22,007	-91,027	22,007	148,973	22,007	20
	U8	21,988	28,961	21,988	-91,039	21,988	148,961	21,988	22
Vedlejší větev	U2	22,635	28,696	22,635	-91,304	22,635	148,696	22,635	0
	U9	22,516	28,63	22,516	-91,37	22,516	148,63	22,516	2
	U10	22,41	28,571	22,41	-91,429	22,41	148,571	22,41	5
	U11	22,395	28,562	22,395	-91,438	22,395	148,562	22,395	6

Tab. 3.3.5-5 Napěťové poměry v síti při odběru jalového výkonu 200 kVar synchronním generátorem

		Pro Q = 200k Var Induktivní		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,42	29,755	114,42	-90,245	114,42	149,755	114,42	
	U2	22,608	28,697	22,608	-91,303	22,608	148,697	22,608	0
	U3	22,437	28,792	22,437	-91,208	22,437	148,792	22,437	3
	U4	22,245	29,011	22,245	-90,989	22,245	149,011	22,245	8
	U5	22,179	29,239	22,179	-90,761	22,179	149,239	22,179	12
	U6	22,002	29,136	22,002	-90,864	22,002	149,136	22,002	17
	U7	21,935	29,095	21,935	-90,905	21,935	149,095	21,935	20
	U8	21,916	29,083	21,916	-90,917	21,916	149,083	21,916	22
Vedlejší větev	U2	22,608	28,697	22,608	-91,303	22,608	148,697	22,608	0
	U9	22,489	28,631	22,489	-91,369	22,489	148,631	22,489	2
	U10	22,382	28,571	22,382	-91,429	22,382	148,572	22,382	5
	U11	22,368	28,563	22,368	-91,437	22,368	148,563	22,368	6

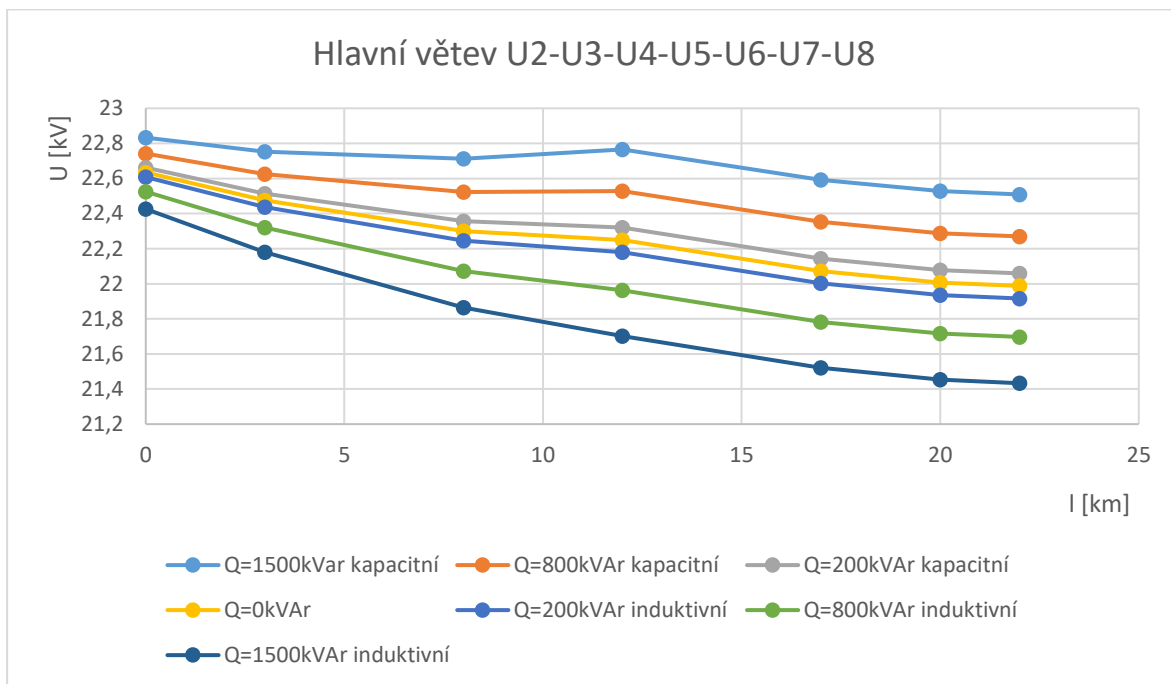
Tab. 3.3.5-6 Napěťové poměry v síti při odběru jalového výkonu 800 kVar synchronním generátorem

		Pro Q = 800 kVar Induktivní		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,335	29,759	114,335	-90,241	114,335	149,759	114,335	
	U2	22,525	28,699	22,525	-91,301	22,525	148,699	22,525	0
	U3	22,32	28,884	22,32	-91,116	22,32	148,884	22,32	3
	U4	22,072	29,258	22,072	-90,742	22,072	149,258	22,072	8
	U5	21,962	29,613	21,962	-90,387	21,962	149,613	21,962	12
	U6	21,783	29,507	21,783	-90,493	21,783	149,507	21,783	17
	U7	21,716	29,466	21,716	-90,534	21,716	149,466	21,716	20
	U8	21,697	29,453	21,697	-90,547	21,697	149,453	21,697	22
Vedlejší větev	U2	22,525	28,699	22,525	-91,301	22,525	148,699	22,525	0
	U9	22,406	28,632	22,406	-91,368	22,406	148,632	22,406	2
	U10	22,298	28,573	22,298	-91,427	22,298	148,573	22,298	5
	U11	22,284	28,564	22,284	-91,436	22,284	148,564	22,284	6

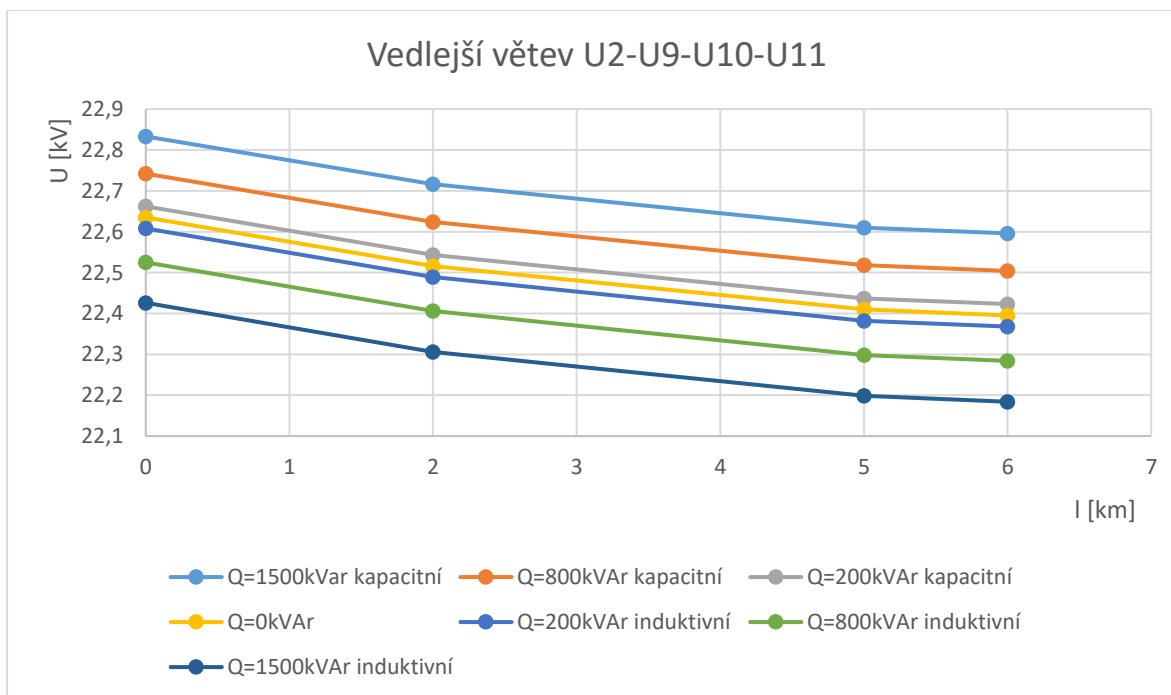
Tab. 3.3.5-7 Napěťové poměry v síti při odběru jalového výkonu 1500 kVar synchronním generátorem

		Pro Q = 1500 kVar Induktivní		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,233	29,764	114,233	-90,236	114,233	149,764	114,233	
	U2	22,426	28,698	22,426	-91,302	22,426	148,698	22,426	0
	U3	22,179	28,99	22,179	-91,01	22,179	148,99	22,179	3
	U4	21,864	29,549	21,864	-90,451	21,864	149,549	21,864	8
	U5	21,702	30,059	21,702	-89,941	21,702	150,059	21,702	12
	U6	21,521	29,95	21,521	-90,05	21,521	149,95	21,521	17
	U7	21,453	29,908	21,453	-90,092	21,453	149,908	21,453	20
	U8	21,433	29,895	21,433	-90,105	21,433	149,895	21,433	22
Vedlejší větev	U2	22,426	28,698	22,426	-91,302	22,426	148,698	22,426	0
	U9	22,306	28,631	22,306	-91,369	22,306	148,631	22,306	2
	U10	22,199	28,57	22,199	-91,43	22,199	148,57	22,199	5
	U11	22,184	28,561	22,184	-91,439	22,184	148,561	22,184	6

Z těchto získaných hodnot pro celkem 7 různých hodnot jalového výkonu sestavíme grafickou závislost $U=f(I)$. Grafy jsou rozdělené na dva, hlavní větev a vedlejší větev. V hlavní větvi vidíme, že dodávka jalového výkonu do sítě snižuje úbytek napětí. Naopak induktivní charakter jalového výkonu, to znamená že odebíráme jalový výkon ze sítě, nám zhoršuje celkový úbytek napětí. Ve vedlejší větvi platí to stejné. Na rozdíl od vedlejší větve, kde velikost napětí klesá téměř lineárně se vzdáleností od napájecího transformátoru, v hlavní větvi pozorujeme vrchol, který prozrazuje že se v síti nachází zdroj jalového výkonu.

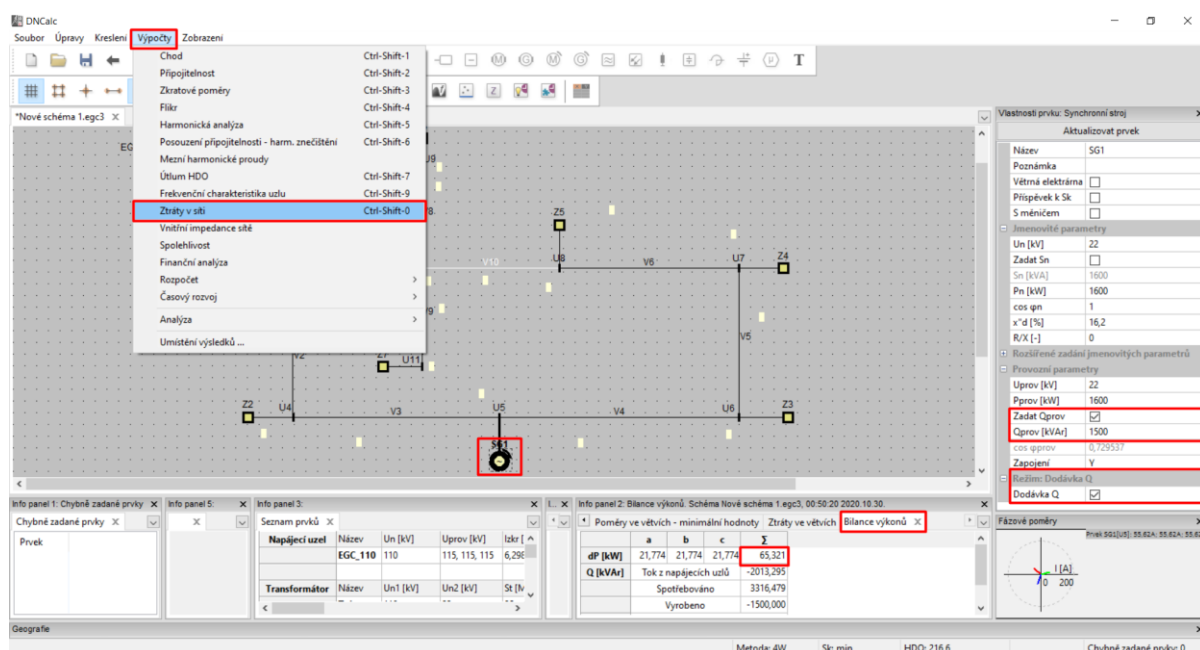


Obr. 3.3.5-3 Závislost $U=f(l)$ pro různé hodnoty dodávaného jalového výkonu synchronním generátorem v hlavní větvi



Obr. 3.3.5-4 Závislost $U=f(l)$ pro různé hodnoty dodávaného jalového výkonu synchronním generátorem ve vedlejší větvi

Při výpočtu ztrát v síti můžeme postupovat takto. Označíme synchronní generátor a zkontrolujeme, že máme správně zadané hodnoty, poté klikneme na záložku „Výpočty“ a vybereme možnost „Ztráty v síti“. Program DNCalc provede výpočet ztrát. V „Infopanelu 2“ se zobrazí výsledky. Program vypočte ztráty ve větvích, ale nám bude stačit pouze bilance výkonů, klikneme tedy na záložku „Bilance výkonů“ a opíšeme celkové činné ztráty. (Tuto hodnotu budeme později potřebovat). Tento výpočet provedeme pro všechny hodnoty jalového výkonu a výsledky zobrazíme pomocí sloupcového grafu. Z grafu na obr. 3.3.2-21 vidíme, že velikost činných ztrát roste zejména s velikostí odebíraného jalového výkonu. S rostoucím odběrem jalového výkonu také stoupá úbytek napětí v síti a zvyšuje se i celkové proudové zatížení jednotlivých úseků vedení, tím tedy i ztráty na vedení, jelikož ztráty rostou s proudovým namáháním.



Obr. 3.3.5-5 DNCalc-Výpočet ztrát v síti

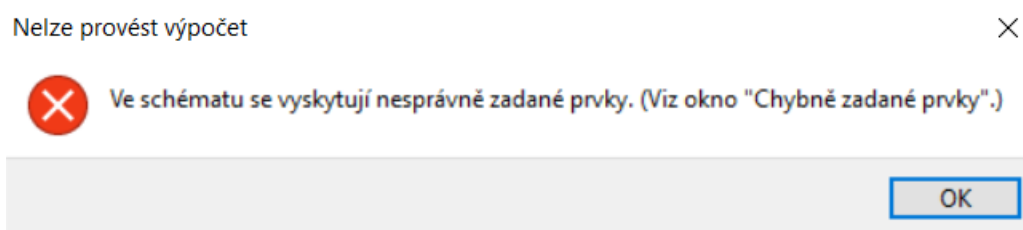


Obr. 3.3.5-6 Velikost celkových ztrát v síti pro různá Q zdroje

3.3.6 Změna činného výkonu

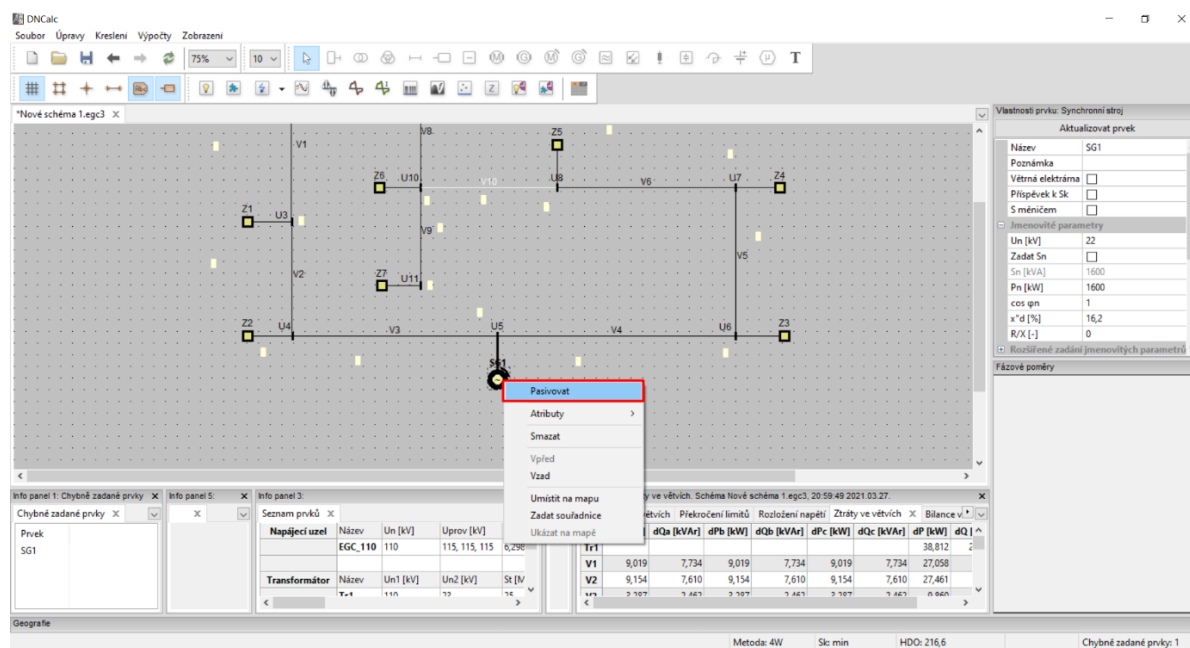
e) Proveďte výpočet ustáleného chodu sítě s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením pro 10 různých hodnot činného výkonu, při stejném $\cos\varphi = 1$ (Měňte v rozsahu od 0 do limitní hodnoty, který jsme vypočetli v bodě b.) Výsledky zanešte do grafu. Do sloupcového grafu vyneste závislost celkových činných ztrát sítě na instalovaném výkonu $\Delta P = f(P_i)$.

V tomto případě budeme měnit činný výkon synchronního generátoru a sledovat změnu napětí v síti. Dle zadání měníme hodnoty od 0 do 1600kW. Volíme krok 160kW, tedy 0,160,320,480,800,...,1600kW. Celkem 10 hodnot. Pokud bychom nastavili na synchronním generátoru nulovou hodnotu činného výkonu, tak pravděpodobně vyskočí chybové hlášení viz níže.



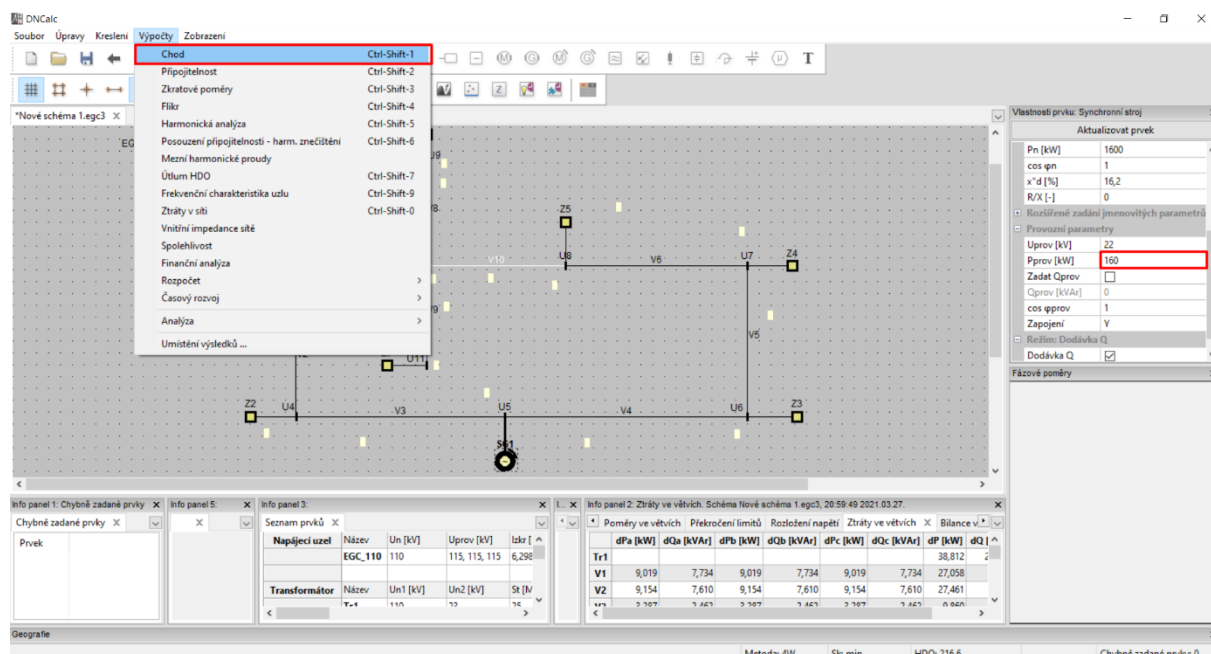
Obr. 3.3.6-1 DNCalc-Chybové hlášení chybně zadaného prvku

Pro změření nulového příspěvku synchronního generátoru sítě jej odpojíme od sítě, a to uděláme tak, že klikneme pravým tlačítkem myši na ikonu synchronního generátoru ve schématu a zvolíme možnost „Pasivovat“. Nyní provedeme výpočet, tak že klikneme na „Výpočty“ v horní liště a zvolíme „Chod“.



Obr. 3.3.6-2 DNCalc-Odpojení synchronního generátoru-Funkce "Pasivovat"

Pro další výpočty klikneme pravým tlačítkem myši na synchronní generátor a zvolíme „Aktivovat“ (Připojíme ho zpět do sítě). V záložce vlastnosti prvku v pravé horní části obrazovky najdeme parametr „Pprov“ a nastavíme požadovanou hodnotu (160kW). Poté znovu spustíme výpočet chodu sítě. Výsledky vyexportujeme do excelu a výstup bude opět v tabulkové podobě s vyznačením hlavní větve a vedlejší větve. Z těchto tabulek se sestaví graf závislosti napětí na činném výkonu dodávaného synchronním generátorem.



Obr. 3.3.6-3 DNCalc-Výpočet chodu sítě pro různá P zdroje

Tab. 3.3.6-1 Napěťové poměry v síti při odpojeném synchronním generátoru

		Pro P = 0 kW		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	αa [°]	Ub [kV]	αb [°]	Uc [kV]	αc [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,398	29,647	114,398	-90,353	114,398	149,647	114,398	
	U2	22,608	28,166	22,608	-91,834	22,608	148,166	22,608	0
	U3	22,35	28,019	22,35	-91,981	22,35	148,019	22,35	3
	U4	22,015	27,827	22,015	-92,173	22,015	147,827	22,015	8
	U5	21,836	27,721	21,836	-92,279	21,836	147,721	21,836	12
	U6	21,667	27,608	21,667	-92,392	21,667	147,608	21,667	17
	U7	21,599	27,567	21,599	-92,433	21,599	147,567	21,599	20
Vedlejší větev	U8	21,579	27,554	21,579	-92,446	21,579	147,554	21,579	22
	U2	22,608	28,166	22,608	-91,834	22,608	148,166	22,608	0
	U9	22,489	28,1	22,489	-91,9	22,489	148,1	22,489	2
	U10	22,382	28,04	22,382	-91,96	22,382	148,04	22,382	5
	U11	22,368	28,032	22,368	-91,968	22,368	148,032	22,368	6

Tab. 3.3.6-2 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 160 kW synchronním generátorem

		Pro P = 160 kW		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,404	29,657	114,404	-90,343	114,404	149,657	114,404	
	U2	22,611	28,22	22,611	-91,78	22,611	148,22	22,611	0
	U3	22,364	28,094	22,364	-91,906	22,364	148,094	22,364	3
	U4	22,045	27,939	22,045	-92,061	22,045	147,939	22,045	8
	U5	21,878	27,863	21,878	-92,137	21,878	147,863	21,878	12
	U6	21,71	27,751	21,71	-92,249	21,71	147,751	21,71	17
	U7	21,642	27,709	21,642	-92,291	21,642	147,709	21,642	20
	U8	21,623	27,697	21,623	-92,303	21,623	147,697	21,623	22
Vedlejší větev	U2	22,611	28,22	22,611	-91,78	22,611	148,22	22,611	0
	U9	22,492	28,154	22,492	-91,846	22,492	148,154	22,492	2
	U10	22,385	28,094	22,385	-91,906	22,385	148,094	22,385	5
	U11	22,371	28,086	22,371	-91,914	22,371	148,086	22,371	6

Tab. 3.3.6-3 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 320 kW synchronním generátorem

		Pro P = 320kW		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,409	29,668	114,409	-90,332	114,409	149,668	114,409	
	U2	22,614	28,273	22,614	-91,727	22,614	148,273	22,614	0
	U3	22,377	28,169	22,377	-91,831	22,377	148,169	22,377	3
	U4	22,074	28,05	22,074	-91,95	22,074	148,05	22,074	8
	U5	21,921	28,005	21,921	-91,995	21,921	148,005	21,921	12
	U6	21,753	27,893	21,753	-92,107	21,753	147,893	21,753	17
	U7	21,685	27,851	21,685	-92,149	21,685	147,851	21,685	20
	U8	21,666	27,839	21,666	-92,161	21,666	147,839	21,666	22
Vedlejší větev	U2	22,614	28,273	22,614	-91,727	22,614	148,273	22,614	0
	U9	22,495	28,207	22,495	-91,793	22,495	148,207	22,495	2
	U10	22,388	28,148	22,388	-91,852	22,388	148,148	22,388	5
	U11	22,374	28,139	22,374	-91,861	22,374	148,139	22,374	6

Tab. 3.3.6-4 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 480 kW synchronním generátorem

		Pro P = 480 kW		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,415	29,679	114,415	-90,321	114,415	149,679	114,415	
	U2	22,617	28,327	22,617	-91,673	22,617	148,327	22,617	0
	U3	22,389	28,244	22,389	-91,756	22,389	148,244	22,389	3
	U4	22,104	28,162	22,104	-91,838	22,104	148,162	22,104	8
	U5	21,963	28,146	21,963	-91,854	21,963	148,146	21,963	12
	U6	21,795	28,034	21,795	-91,966	21,795	148,034	21,795	17
	U7	21,728	27,993	21,728	-92,007	21,728	147,993	21,728	20
	U8	21,709	27,981	21,709	-92,019	21,709	147,981	21,709	22
Vedlejší větev	U2	22,617	28,327	22,617	-91,673	22,617	148,327	22,617	0
	U9	22,498	28,261	22,498	-91,739	22,498	148,261	22,498	2
	U10	22,391	28,202	22,391	-91,798	22,391	148,202	22,391	5
	U11	22,377	28,193	22,377	-91,807	22,377	148,193	22,377	6

Tab. 3.3.6-5 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 640 kW synchronním generátorem

		Pro P = 640 kW		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,42	29,69	114,42	-90,31	114,42	149,69	114,42	
	U2	22,62	28,38	22,62	-91,62	22,62	148,38	22,62	0
	U3	22,402	28,319	22,402	-91,681	22,402	148,319	22,402	3
	U4	22,133	28,273	22,133	-91,727	22,133	148,273	22,133	8
	U5	22,005	28,286	22,005	-91,714	22,005	148,286	22,005	12
	U6	21,837	28,175	21,837	-91,825	21,837	148,175	21,837	17
	U7	21,77	28,134	21,77	-91,866	21,77	148,134	21,77	20
	U8	21,751	28,121	21,751	-91,879	21,751	148,121	21,751	22
Vedlejší větev	U2	22,62	28,38	22,62	-91,62	22,62	148,38	22,62	0
	U9	22,501	28,314	22,501	-91,686	22,501	148,314	22,501	2
	U10	22,394	28,255	22,394	-91,745	22,394	148,255	22,394	5
	U11	22,38	28,246	22,38	-91,754	22,38	148,246	22,38	6

Tab. 3.3.6-6 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 800 kW synchronním generátorem

		Pro P = 800 kW		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,425	29,7	114,425	-90,3	114,425	149,7	114,425	
	U2	22,623	28,433	22,623	-91,567	22,623	148,433	22,623	0
	U3	22,415	28,393	22,415	-91,607	22,415	148,393	22,415	3
	U4	22,161	28,383	22,161	-91,617	22,161	148,383	22,161	8
	U5	22,047	28,426	22,047	-91,574	22,047	148,426	22,047	12
	U6	21,879	28,315	21,879	-91,685	21,879	148,315	21,879	17
	U7	21,812	28,274	21,812	-91,726	21,812	148,274	21,812	20
	U8	21,793	28,262	21,793	-91,738	21,793	148,262	21,793	22
Vedlejší větev	U2	22,623	28,433	22,623	-91,567	22,623	148,433	22,623	0
	U9	22,504	28,367	22,504	-91,633	22,504	148,367	22,504	2
	U10	22,397	28,308	22,397	-91,692	22,397	148,308	22,397	5
	U11	22,383	28,299	22,383	-91,701	22,383	148,299	22,383	6

Tab. 3.3.6-7 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 960 kW synchronním generátorem

		Pro P = 960 kW		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,43	29,711	114,43	-90,289	114,43	149,711	114,43	
	U2	22,625	28,486	22,625	-91,514	22,625	148,486	22,625	0
	U3	22,427	28,467	22,427	-91,533	22,427	148,467	22,427	3
	U4	22,19	28,493	22,19	-91,507	22,19	148,493	22,19	8
	U5	22,088	28,565	22,088	-91,435	22,088	148,565	22,088	12
	U6	21,921	28,455	21,921	-91,545	21,921	148,455	21,921	17
	U7	21,854	28,414	21,854	-91,586	21,854	148,414	21,854	20
	U8	21,835	28,402	21,835	-91,598	21,835	148,402	21,835	22
Vedlejší větev	U2	22,625	28,486	22,625	-91,514	22,625	148,486	22,625	0
	U9	22,506	28,42	22,506	-91,58	22,506	148,42	22,506	2
	U10	22,4	28,361	22,4	-91,639	22,4	148,361	22,4	5
	U11	22,386	28,352	22,386	-91,648	22,386	148,352	22,386	6

Tab. 3.3.6-8 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 1120 kW synchronním generátorem

		Pro P = 1120 kW		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,435	29,721	114,435	-90,279	114,435	149,721	114,435	
	U2	22,628	28,539	22,628	-91,461	22,628	148,539	22,628	0
	U3	22,439	28,541	22,439	-91,459	22,439	148,541	22,439	3
	U4	22,218	28,603	22,218	-91,397	22,218	148,603	22,218	8
	U5	22,129	28,704	22,129	-91,296	22,129	148,704	22,129	12
	U6	21,962	28,594	21,962	-91,406	21,962	148,594	21,962	17
	U7	21,895	28,553	21,895	-91,447	21,895	148,553	21,895	20
	U8	21,876	28,541	21,876	-91,459	21,876	148,541	21,876	22
Vedlejší větev	U2	22,628	28,539	22,628	-91,461	22,628	148,539	22,628	0
	U9	22,509	28,473	22,509	-91,527	22,509	148,473	22,509	2
	U10	22,402	28,414	22,402	-91,586	22,402	148,414	22,402	5
	U11	22,388	28,405	22,388	-91,595	22,388	148,405	22,388	6

Tab. 3.3.6-9 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 1280 kW synchronním generátorem

		Pro P = 1280 kW		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,439	29,732	114,439	-90,268	114,439	149,732	114,439	
	U2	22,63	28,591	22,63	-91,409	22,63	148,591	22,63	0
	U3	22,451	28,615	22,451	-91,385	22,451	148,615	22,451	3
	U4	22,246	28,712	22,246	-91,288	22,246	148,712	22,246	8
	U5	22,17	28,842	22,17	-91,158	22,17	148,842	22,17	12
	U6	22,003	28,732	22,003	-91,268	22,003	148,732	22,003	17
	U7	21,936	28,692	21,936	-91,308	21,936	148,692	21,936	20
	U8	21,917	28,68	21,917	-91,32	21,917	148,68	21,917	22
Vedlejší větev	U2	22,63	28,591	22,63	-91,409	22,63	148,591	22,63	0
	U9	22,512	28,525	22,512	-91,475	22,512	148,525	22,512	2
	U10	22,405	28,466	22,405	-91,534	22,405	148,466	22,405	5
	U11	22,391	28,457	22,391	-91,543	22,391	148,457	22,391	6

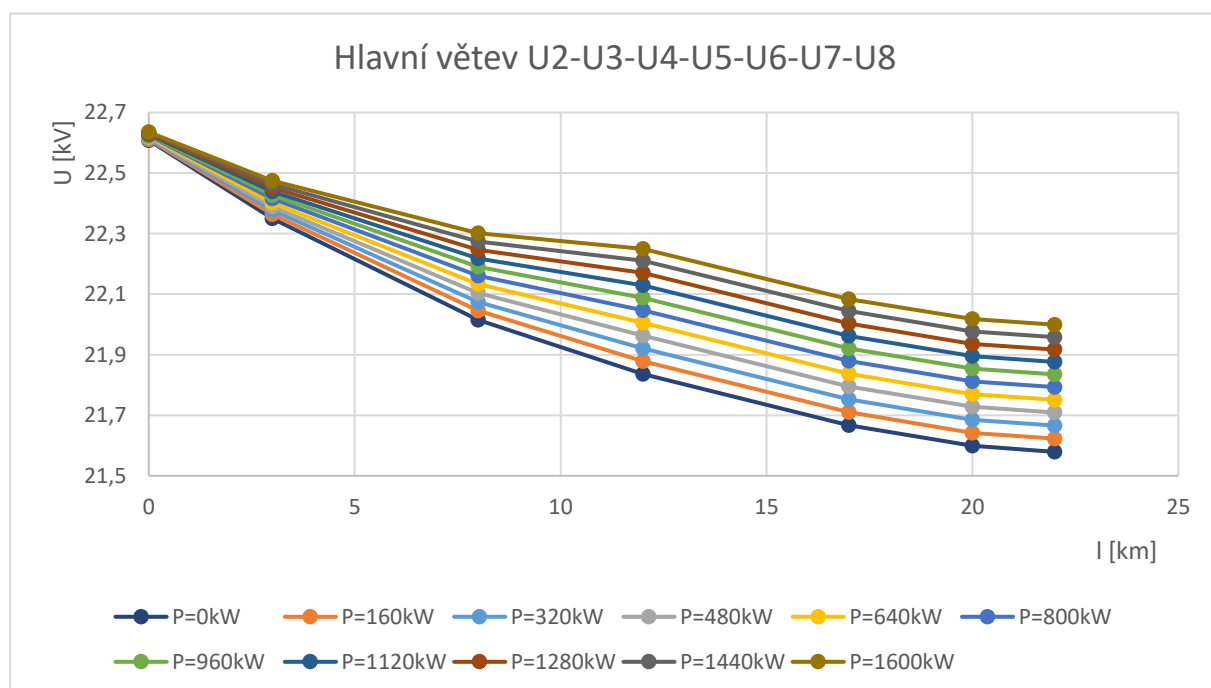
Tab. 3.3.6-10 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 1440 kW synchronním generátorem

		Pro P = 1440 kW		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,444	29,743	114,444	-90,257	114,444	149,743	114,444	
	U2	22,633	28,644	22,633	-91,356	22,633	148,644	22,633	0
	U3	22,463	28,688	22,463	-91,312	22,463	148,688	22,463	3
	U4	22,274	28,822	22,274	-91,178	22,274	148,822	22,274	8
	U5	22,21	28,98	22,21	-91,02	22,21	148,98	22,21	12
	U6	22,044	28,871	22,044	-91,129	22,044	148,871	22,044	17
	U7	21,977	28,83	21,977	-91,17	21,977	148,83	21,977	20
	U8	21,958	28,818	21,958	-91,182	21,958	148,818	21,958	22
Vedlejší větev	U2	22,633	28,644	22,633	-91,356	22,633	148,644	22,633	0
	U9	22,514	28,578	22,514	-91,422	22,514	148,578	22,514	2
	U10	22,407	28,519	22,407	-91,481	22,407	148,519	22,407	5
	U11	22,393	28,51	22,393	-91,49	22,393	148,51	22,393	6

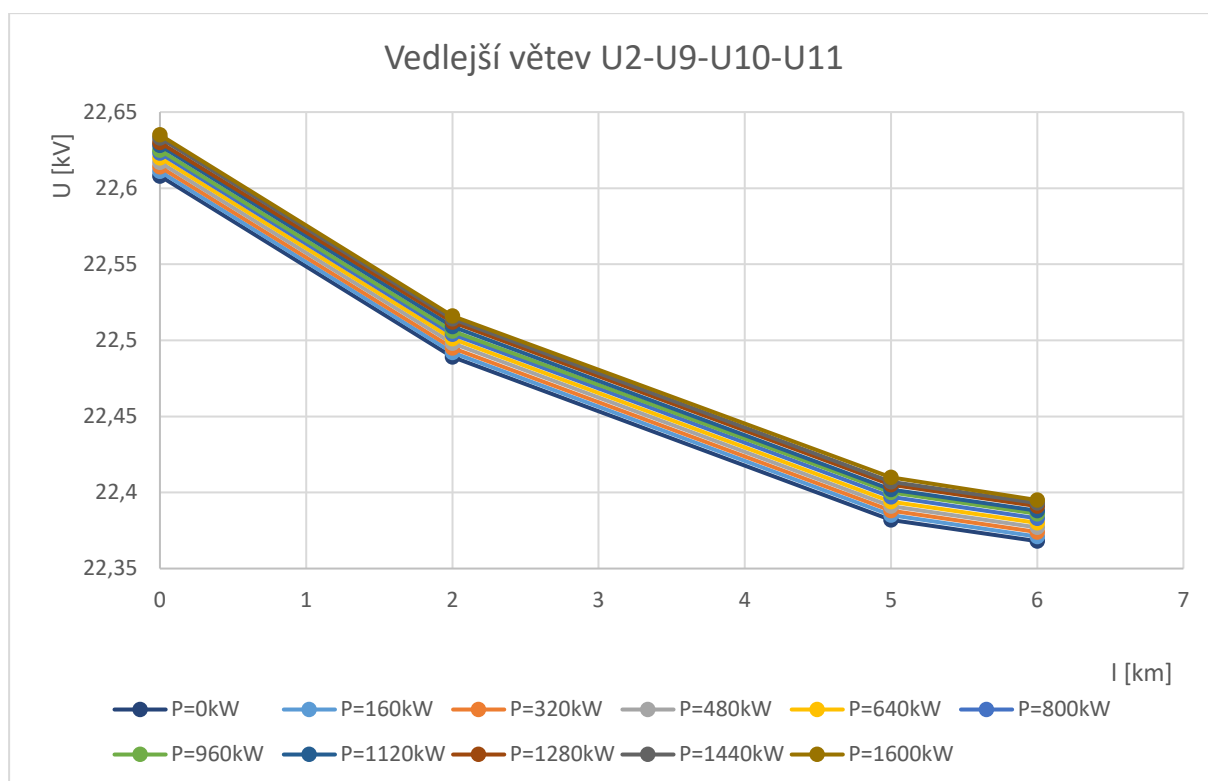
Tab. 3.3.6-11 Napěťové poměry v síti při dodávce činného výkonu 1600 kW synchronním generátorem

		Pro P = 1600 kW		Poměry v uzlech					
		Ua [kV]	α_a [°]	Ub [kV]	α_b [°]	Uc [kV]	α_c [°]	U [kV]	l [km]
Hlavní větev	U1	114,448	29,753	114,448	-90,247	114,448	149,753	114,448	
	U2	22,635	28,696	22,635	-91,304	22,635	148,696	22,635	0
	U3	22,475	28,761	22,475	-91,239	22,475	148,761	22,475	3
	U4	22,301	28,93	22,301	-91,07	22,301	148,93	22,301	8
	U5	22,25	29,117	22,25	-90,883	22,25	149,117	22,25	12
	U6	22,084	29,008	22,084	-90,992	22,084	149,008	22,084	17
	U7	22,018	28,968	22,018	-91,032	22,018	148,968	22,018	20
	U8	21,999	28,956	21,999	-91,044	21,999	148,956	21,999	22
Vedlejší větev	U2	22,635	28,696	22,635	-91,304	22,635	148,696	22,635	0
	U9	22,516	28,63	22,516	-91,37	22,516	148,63	22,516	2
	U10	22,41	28,571	22,41	-91,429	22,41	148,571	22,41	5
	U11	22,395	28,562	22,395	-91,438	22,395	148,562	22,395	6

Z těchto tabulek pro 10 různých hodnot nastaveného činného výkonu na synchronním generátoru sestojíme grafickou závislost $U=f(l)$. Grafy budou tak jako v předchozím úkolu rozděleny na hlavní a vedlejší větev. Přítomnost synchronního generátoru si můžeme všimnout v prvním grafu na obr. 3.3.2-26, kde dojde k nepatrnému zvýšení napětí, respektive snížení úbytku napětí. Celkově změna dodávaného výkonu nemá takový vliv v porovnání se změnou jalového výkonu, dojde však ke snížení úbytku napětí na konci sítě v hlavní větvi, a to zejména vlivem odlehčení sítě přemístěním výroby blíže ke spotřebiteli.

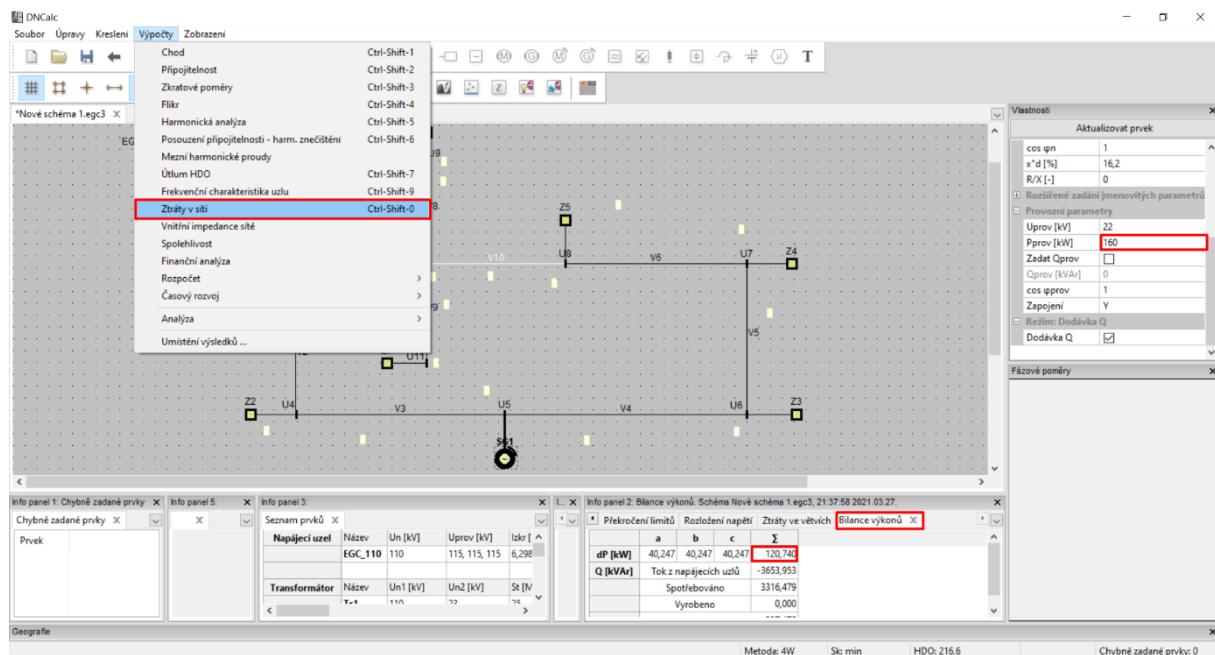


Obr. 3.3.6-4 Závislost $U=f(l)$ při různém dodávaném činném výkonu synchronního generátoru v hlavní větvi

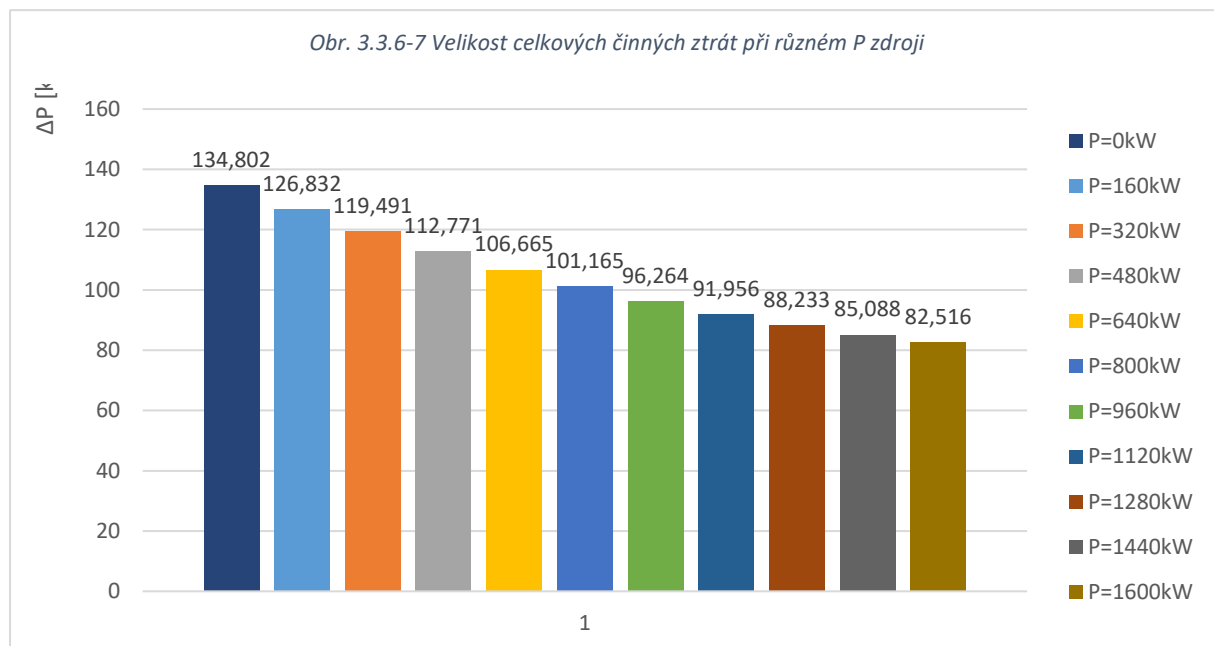


Obr. 3.3.6-5 Závislost $U=f(l)$ při různém dodávaném činném výkonu synchronního generátoru ve vedlejší větvi

Výpočet ztrát v síti provedeme stejným způsobem jako v předchozím úkolu. Na synchronním generátoru měníme hodnotu „Pprov“ a pro každou hodnotu odečteme hodnotu činných ztrát, kterou vypočteme tak, že v horní liště „Výpočty“ zvolíme „Ztráty v síti“. Z vypočtených hodnot sestavíme sloupcový graf závislosti celkových činných ztrát pro jednotlivé výkony. Z grafu vidíme, že zvyšováním činného výkonu synchronního generátoru se sníží nepatrně činné ztráty, což je zejména způsobeno přenosem výroby činného výkonu blíže ke spotřebiteli a tím i snížení namáhání sítě ve směru od napájecí trafostanice.

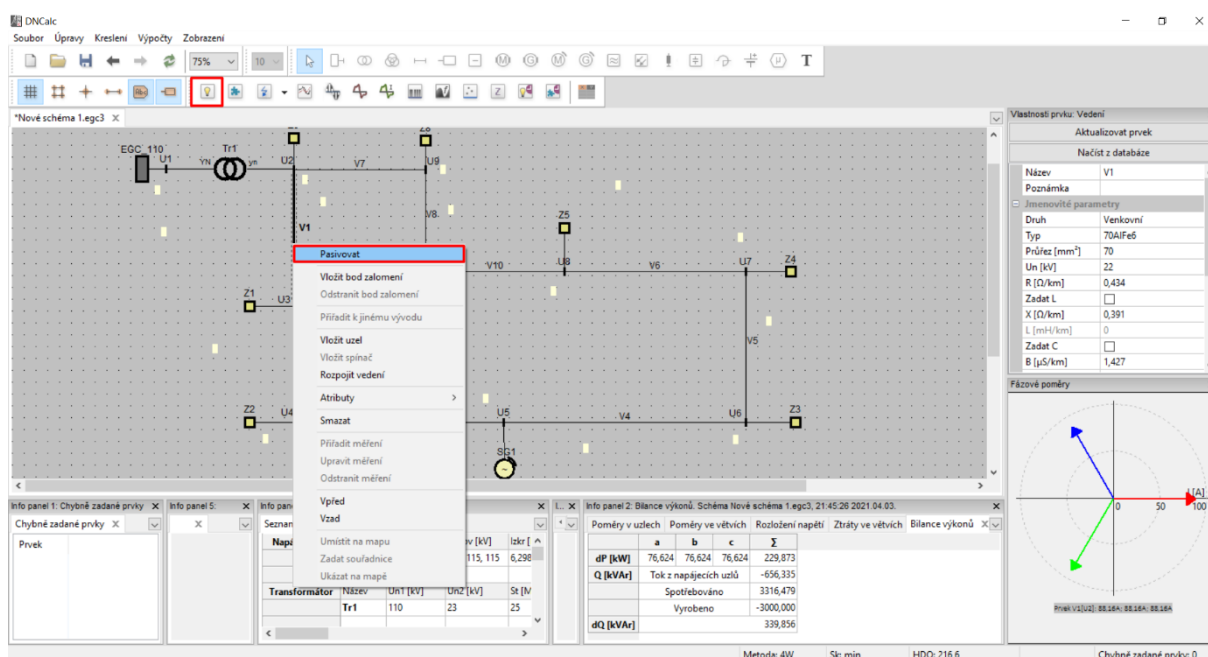


Obr. 3.3.6-6 DNCalc-Výpočet ztrát při různém dodávaném činném výkonu do sítě synchronním generátorem



f) Proveďte výpočet ustáleného chodu sítě s připojeným zdrojem, s připojeným záložním vedením a odpojení nejdříve jednoho paprsku na vývodu z napájecího transformátor 22kV, a poté i po odpojení druhého paprsku. Výstupem bude tabulka s procentním zatížením jednotlivých prvků sítě (úseky vedení, transformátor) a grafická závislost $U = f(l)$ s vyznačenou přímkou znázorňující 5 % dovolený úbytek napětí.

Nejdříve připojíme záložní vedení a to tak, že klikneme pravým tlačítkem myši na záložní vedení a zvolíme možnost „Aktivovat“. Pro odpojení paprsku vedení zvolíme stejný postup. Klikneme na vedení V1 pravým tlačítkem myši a zvolíme „Pasivovat“. Na synchronním generátoru nastavíme hodnotu P_n a P_{prov} na 1600 kW. Uvažujeme jmenovitý výkon generátoru. Poté provedeme výpočet chodu sítě z menu „Výpočty“ -> „Chod“.



Obr. 3.3.6-8 DNCalc-Odpojení jednoho paprsku přírodního vedení

Z „infopanelu 2“ vpravo dole pod schématem jsi zkopírujeme výsledky do excelu, buďto klasickým CTRL+C a CTRL+V anebo pomocí exportu dat v menu „Soubor“ -> „Exportovat“ viz. předchozí příklady. Výsledky zpracujeme do podoby tabulek, ze kterých potom vykreslíme grafickou závislost $U=f(l)$.

Tab. 3.3.6-12 Zatížení transformátoru při odpojení přírodního vedení V1

Poměry v transformátoru										
	Uzel	Ia [A]	α_a [°]	Ib [A]	α_b [°]	Ic [A]	α_c [°]	Istř [A]	In [A]	Iz [%]
Tr1	U1	28,68	-39,801	28,68	-159,8	28,68	80,199	28,68	131	21,89

Tab. 3.3.6-13 Zatížení jednotlivých vedení při odpojeném přívodním vedení V1

Poměry ve větvích										
	Uzel	Ia [A]	α_a [°]	Ib [A]	α_b [°]	Ic [A]	α_c [°]	Istř [A]	I _{max} [A]	Iz [%]
V7	U2	113,56	-41,117	113,561	-161,12	113,561	78,883	113,56	225	50,47
	U9	113,59	138,869	113,585	18,869	113,585	-101,13	113,59	225	50,48
V8	U9	89,752	-43,894	89,752	-163,89	89,752	76,106	89,752	225	39,89
	U10	89,77	136,093	89,77	16,093	89,77	-103,91	89,77	225	39,9
V9	U10	14,56	-29,641	14,56	-149,64	14,56	90,359	14,56	225	6,471
	U11	14,569	150,296	14,569	30,296	14,569	-89,704	14,569	225	6,475
V10	U8	54,88	127,584	54,88	7,584	54,88	-112,42	54,88	225	24,39
	U10	54,852	-52,392	54,852	-172,39	54,852	67,608	54,852	225	24,38
V6	U7	46,199	122,928	46,199	2,928	46,199	-117,07	46,199	225	20,53
	U8	46,169	-57,047	46,169	-177,05	46,169	62,953	46,169	225	20,52
V5	U6	34,962	113,325	34,962	-6,675	34,962	-126,68	34,962	225	15,54
	U7	34,938	-66,657	34,938	173,343	34,938	53,343	34,938	225	15,53
V4	U5	21,409	75,082	21,409	-44,918	21,409	-164,92	21,409	225	9,515
	U6	21,374	-104,94	21,374	135,059	21,374	15,059	21,374	225	9,5
V3	U4	42,818	150,04	42,818	30,04	42,818	-89,96	42,818	225	19,03
	U5	42,8	-29,919	42,8	-149,92	42,8	90,081	42,8	225	19,02
V2	U3	19,917	150,587	19,917	30,587	19,917	-89,413	19,917	225	8,852
	U4	19,896	-29,301	19,896	-149,3	19,896	90,699	19,896	225	8,843

Tab. 3.3.6-14 Napěťové poměry v síti při odpojeném přívodním vedení V1

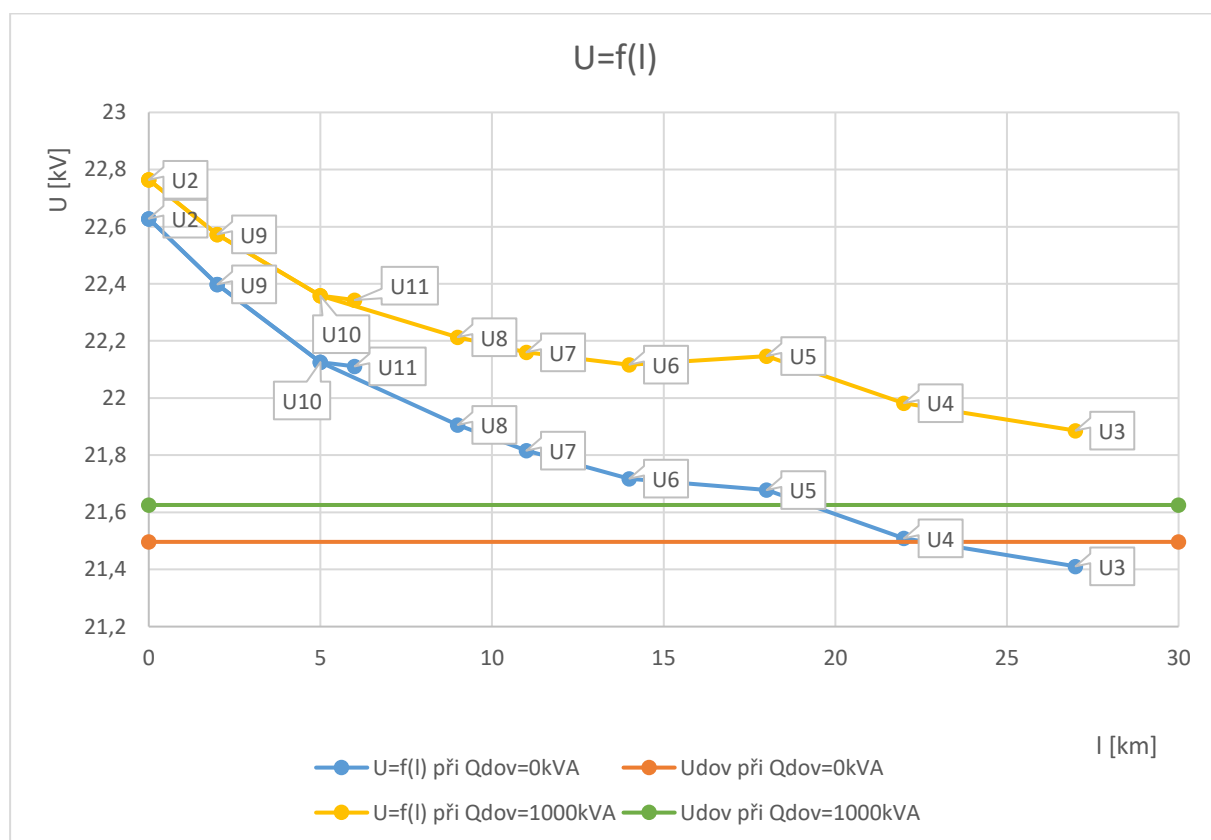
Při P _n =1600 kW, Q _{dov} =0kVAr				Poměry v uzlech						
	U _a [kV]	α_a [°]	U _b [kV]	α_b [°]	U _c [kV]	α_c [°]	U [kV]	ΔU [kV]	ΔU [%]	l [km]
U2	22,63	28,678	22,628	-91,322	22,628	148,678	22,628	0	0	0
U9	22,4	28,656	22,398	-91,344	22,398	148,656	22,398	0,23	1,0164	2
U10	22,13	28,662	22,126	-91,338	22,126	148,662	22,126	0,502	2,2185	5
U8	21,91	28,754	21,906	-91,246	21,906	148,754	21,906	0,722	3,1907	9
U7	21,82	28,812	21,816	-91,188	21,816	148,812	21,816	0,812	3,5885	11
U6	21,72	28,924	21,718	-91,076	21,718	148,924	21,718	0,91	4,0216	14
U5	21,68	29,112	21,678	-90,888	21,678	149,112	21,678	0,95	4,1983	18
U4	21,51	29,008	21,509	-90,992	21,509	149,008	21,509	1,119	4,9452	22
U3	21,41	28,945	21,411	-91,055	21,411	148,945	21,411	1,217	5,3783	27
U2	22,63	28,678	22,628	-91,322	22,628	148,678	22,628	0	0	0
U9	22,4	28,656	22,398	-91,344	22,398	148,656	22,398	0,23	1,0164	2
U10	22,13	28,662	22,126	-91,338	22,126	148,662	22,126	0,502	2,2185	5
U11	22,11	28,653	22,111	-91,347	22,111	148,653	22,111	0,517	2,2848	6

Tabulku pro úbytek napětí je zkonstruována takto, jelikož vedení se v uzlu U10 rozděluje. Úbytek napětí překračuje dovolený úbytek. V uzlu U5, kde je připojen synchronní generátor můžeme pozorovat mírné zlepšení napěťových poměrů. Nejvíce je síť zatěžována na vedení V7, které přenáší veškerý potřebný výkon. Toto vedení je zatíženo na 50 % svého maximálního proudu. Jelikož úbytek napětí nesplňuje podmínku 5% poklesu od počátku sítě, zvýšíme výrobu jalového výkonu synchronního

generátoru. Klikneme na synchronní generátor a v menu „Vlastnosti prvku“ v pravém horní rohu zaškrtneme políčko „Zadat Qprov“ a do pole pod ním zadáme hodnotu 1000 kVA viz obr. Nakonec provedeme znovu výpočet ustáleného chodu sítě a zobrazíme výsledky.

Tab. 3.3.6-15 Úbytky napětí v síti při dodávce jalového výkonu 1000 kVAr synchronním generátorem

Při Pn=1600 kW, Qdov=1000 kVAr				Poměry v uzlech						
	Ua [kV]	αa [°]	Ub [kV]	αb [°]	Uc [kV]	αc [°]	U [kV]	ΔU [kV]	ΔU [%]	l [km]
U2	22,764	28,675	22,764	-91,325	22,764	148,675	22,764	0	0	0
U9	22,573	28,556	22,573	-91,444	22,573	148,556	22,573	0,191	0,84	2
U10	22,358	28,414	22,358	-91,586	22,358	148,414	22,358	0,406	1,78	5
U8	22,213	28,303	22,213	-91,697	22,213	148,303	22,213	0,551	2,42	9
U7	22,16	28,259	22,16	-91,741	22,16	148,259	22,16	0,604	2,65	11
U6	22,117	28,214	22,117	-91,786	22,117	148,214	22,117	0,647	2,84	14
U5	22,147	28,208	22,147	-91,792	22,147	148,208	22,147	0,617	2,71	18
U4	21,982	28,108	21,982	-91,892	21,982	148,108	21,982	0,782	3,44	22
U3	21,886	28,047	21,886	-91,953	21,886	148,047	21,886	0,878	3,86	27
U2	22,764	28,675	22,764	-91,325	22,764	148,675	22,764	0	0	0
U9	22,573	28,556	22,573	-91,444	22,573	148,556	22,573	0,191	0,84	2
U10	22,358	28,414	22,358	-91,586	22,358	148,414	22,358	0,406	1,78	5
U11	22,343	28,405	22,343	-91,595	22,343	148,405	22,343	0,421	1,85	6



Obr. 3.3.6-9 Závislost $U=f(l)$ při odpojení napájecím vedení V1 a při různém Q synchronního generátoru

V grafu na obr. 3.3.2-30 můžeme vidět dvě závislosti napětí na délce vedení. První při nulovém dodávaném jalovém výkonu synchronním generátorem. Uzel U3 je v tomto případě pod dovoleným úbytkem napětí, a proto musíme zlepšit napěťové poměry v síti. V druhé závislosti, kdy synchronní generátor dodává do sítě 1000 kVA jalového výkonu se výrazně sníží úbytek napětí. Jelikož dochází k odlehčení sítě, dojde i ke zvýšení napětí na začátku vedení a zvýší se i hranice povoleného úbytku napětí. Změna dodávky jalového výkonu má za následek i změnu zatížení jednotlivých vedení a transformátoru, proto je nutné znovu provést výpočet ustáleného chodu sítě a zobrazit zatížení jednotlivých prvků sítě.

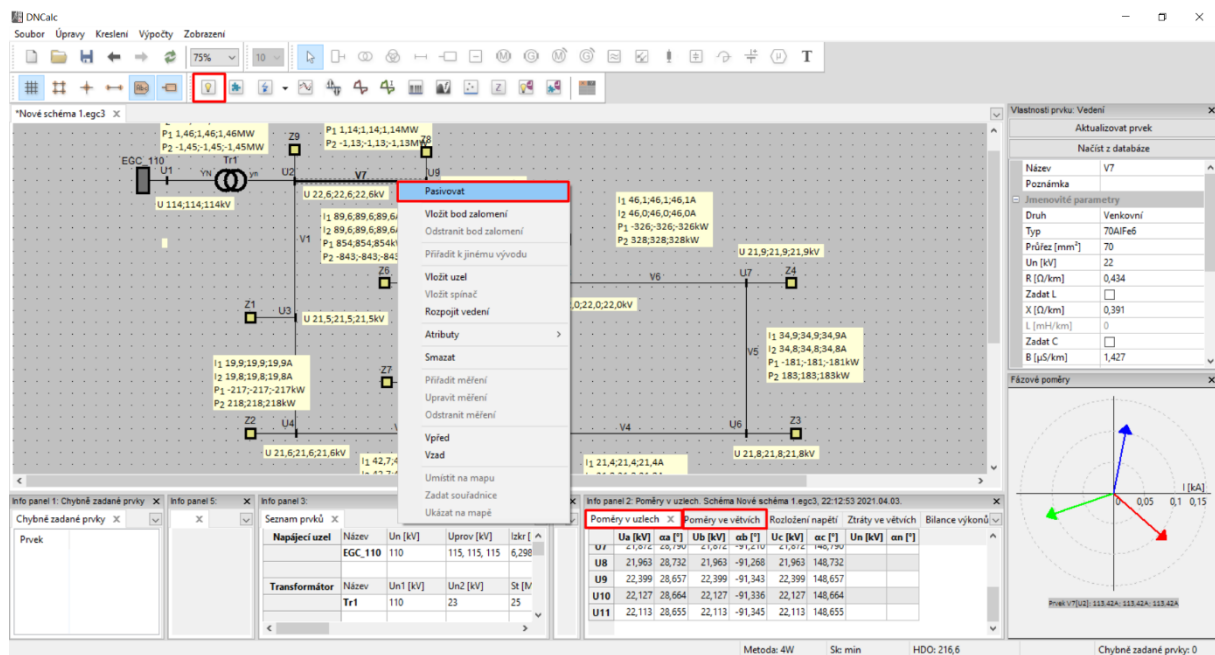
Tab. 3.3.6-16 Zatížení jednotlivých vedení při odpojení napájecím vedení V1 a při dodávce $Q = 1000 \text{ kVAr}$ synchronním generátorem

Poměry ve větvích										
	Uzel	$I_a \text{ [A]}$	$\alpha_a \text{ [}^\circ\text{]}$	$I_b \text{ [A]}$	$\alpha_b \text{ [}^\circ\text{]}$	$I_c \text{ [A]}$	$\alpha_c \text{ [}^\circ\text{]}$	$I_{stř} \text{ [A]}$	$I_{max} \text{ [A]}$	$I_z \text{ [%]}$
V7	U2	97,335	-29,536	97,335	-149,536	97,335	90,464	97,34	225	43,26
	U9	97,353	150,444	97,353	30,444	97,353	-89,556	97,35	225	43,268
V8	U9	73,226	-29,084	73,226	-149,084	73,226	90,916	73,23	225	32,545
	U10	73,239	150,897	73,239	30,897	73,239	-89,103	73,24	225	32,551
V9	U10	14,409	-29,888	14,409	-149,888	14,409	90,112	14,41	225	6,404
	U11	14,417	150,048	14,417	30,048	14,417	-89,952	14,42	225	6,4076
V10	U8	37,257	152,989	37,257	32,989	37,257	-87,011	37,26	225	16,559
	U10	37,241	-26,96	37,241	-146,96	37,241	93,04	37,24	225	16,552
V6	U7	27,809	153,958	27,809	33,958	27,809	-86,042	27,81	225	12,36
	U8	27,794	-25,973	27,794	-145,973	27,794	94,027	27,79	225	12,353
V5	U6	15,011	158,367	15,011	38,367	15,011	-81,633	15,01	225	6,6716
	U7	15,002	-21,535	15,002	-141,535	15,002	98,465	15	225	6,6676
V4	U5	7,685	-50,278	7,685	-170,278	7,685	69,722	7,685	225	3,4156
	U6	7,713	129,542	7,713	9,542	7,713	-110,458	7,713	225	3,428
V3	U4	41,892	149,143	41,892	29,143	41,892	-90,857	41,89	225	18,619
	U5	41,875	-30,813	41,875	-150,813	41,875	89,187	41,88	225	18,611
V2	U3	19,485	149,69	19,485	29,69	19,485	-90,31	19,49	225	8,66
	U4	19,464	-30,193	19,464	-150,193	19,464	89,807	19,46	225	8,6507

Tab. 3.3.6-17 Zatížení transformátoru při odpojení napájecím vedení V1 a při dodávce $Q = 1000 \text{ kVAr}$ synchronním generátorem

Poměry v transformátoru										
	Uzel	$I_a \text{ [A]}$	$\alpha_a \text{ [}^\circ\text{]}$	$I_b \text{ [A]}$	$\alpha_b \text{ [}^\circ\text{]}$	$I_c \text{ [A]}$	$\alpha_c \text{ [}^\circ\text{]}$	$I_{stř} \text{ [A]}$	$I_n \text{ [A]}$	$I_z \text{ [%]}$
Tr1	U1	25,397	-30,727	25,397	-150,727	25,397	89,273	25,4	131	19,387

Pro druhý paprsek provedeme výpočet obdobně. „Aktivujeme“ vedení V1 a odpojíme vedení V7 a to tak, že na něj klikneme pravým tlačítkem myši a zvolíme možnost „Pasivovat“. V horní liště „Výpočty“ zvolíme „Chod“. Tím provedeme výpočet ustáleného chodu sítě. Výsledky znovu vyexportujeme do excelu, kde z hodnot vytvoříme tabulky a grafickou závislost viz předchozí bod.



Obr. 3.3.6-10 DNCalc-Výpočet chodu sítě při odpojeném napájecím vedení V7

Tab. 3.3.6-18 Zatížení transformátoru při odpojeném napájecím vedení V7

Poměry v transformátoru										
	Uzel	Ia [A]	α [°]	Ib [A]	α [°]	Ic [A]	α [°]	Istř [A]	In [A]	Iz [%]
Tr1	U1	30,015	-40,041	30,015	-160,04	30,015	79,959	30,015	131	22,91

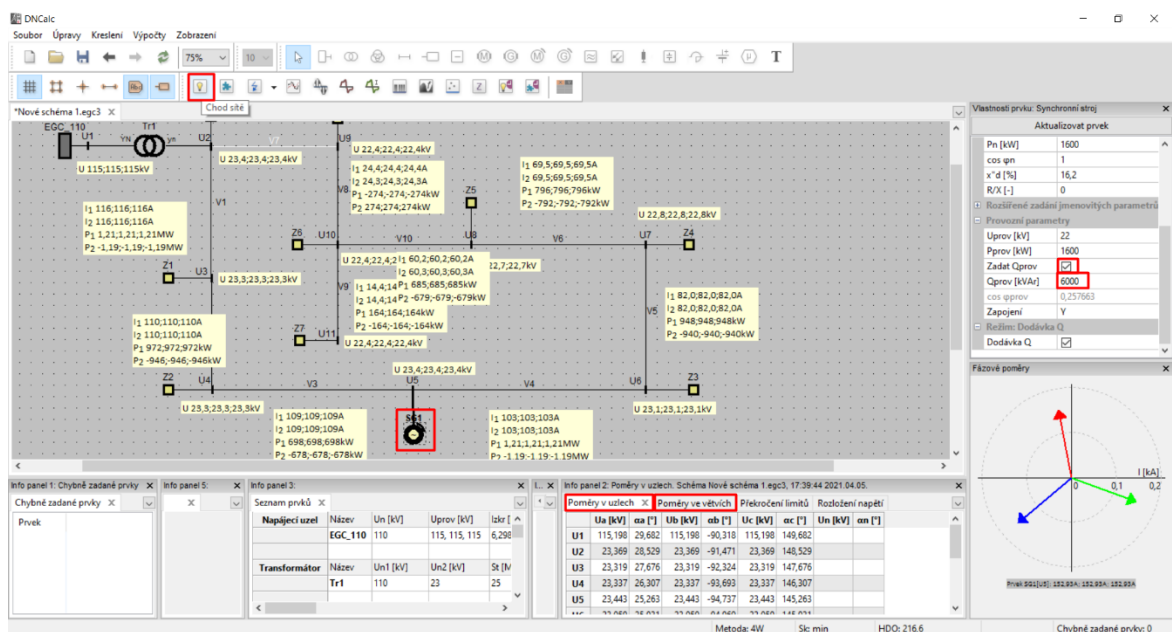
Tab. 3.3.6-19 Zatážení jednotlivých vedení při odpojeném napájecím vedení V7

Poměry ve větvích										
	Uzel	Ia [A]	α [°]	Ib [A]	α [°]	Ic [A]	α [°]	Istř [A]	I _{max} [A]	Iz [%]
V1	U2	120,18	-41,331	120,179	-161,33	120,179	78,669	120,18	225	53,41
	U3	120,2	138,659	120,197	18,659	120,197	-101,34	120,2	225	53,42
V2	U3	101,48	-43,513	101,483	-163,51	101,483	76,487	101,48	225	45,1
	U4	101,51	136,468	101,513	16,468	101,513	-103,53	101,51	225	45,12
V3	U4	79,516	-47,096	79,516	-167,1	79,516	72,904	79,516	225	35,34
	U5	79,541	132,886	79,541	12,886	79,541	-107,11	79,541	225	35,35
V4	U5	113,93	-31,367	113,929	-151,37	113,929	88,633	113,93	225	50,64
	U6	113,95	148,618	113,946	28,618	113,946	-91,382	113,95	225	50,64
V5	U6	90,665	-31,435	90,665	-151,44	90,665	88,565	90,665	225	40,3
	U7	90,678	148,551	90,678	28,551	90,678	-91,449	90,678	225	40,3
V6	U7	76,867	-31,47	76,867	-151,47	76,867	88,53	76,867	225	34,16
	U8	76,884	148,508	76,884	28,508	76,884	-91,492	76,884	225	34,17
V8	U9	26,952	148,36	26,952	28,36	26,952	-91,64	26,952	225	11,98
	U10	26,94	-31,594	26,94	-151,59	26,94	88,406	26,94	225	11,97
V9	U10	15,877	-30,364	15,877	-150,36	15,877	89,636	15,877	225	7,056
	U11	15,885	149,583	15,885	29,583	15,885	-90,417	15,885	225	7,06
V10	U8	66,642	-31,683	66,642	-151,68	66,642	88,317	66,642	225	29,62
	U10	66,659	148,292	66,659	28,292	66,659	-91,708	66,659	225	29,63

Tab. 3.3.6-20 Napěťové poměry v síti při odpojeném napájecím vedení V7

Při Pn=1600 kW, Qdov=0 kVar				Poměry v uzlech						
	Ua [kV]	αa [°]	Ub [kV]	αb [°]	Uc [kV]	αc [°]	U [kV]	ΔU [kV]	ΔU [%]	l [km]
U2	22,6	28,623	22,604	-91,377	22,604	148,623	22,604	0	0	0
U3	22,24	28,589	22,24	-91,411	22,24	148,589	22,24	0,364	1,6103	3
U4	21,73	28,592	21,727	-91,408	21,727	148,592	21,727	0,877	3,8798	8
U5	21,41	28,647	21,407	-91,353	21,407	148,647	21,407	1,197	5,2955	12
U6	20,98	28,368	20,984	-91,632	20,984	148,369	20,984	1,62	7,1669	16
U7	20,72	28,208	20,716	-91,792	20,716	148,208	20,716	1,888	8,3525	19
U8	20,56	28,115	20,564	-91,885	20,564	148,115	20,564	2,04	9,025	21
U10	20,37	27,995	20,367	-92,005	20,367	147,995	20,367	2,237	9,8965	25
U9	20,29	27,945	20,288	-92,055	20,288	147,945	20,288	2,316	10,246	28
U2	22,6	28,623	22,604	-91,377	22,604	148,623	22,604	0	0	0
U3	22,24	28,589	22,24	-91,411	22,24	148,589	22,24	0,364	1,6103	3
U4	21,73	28,592	21,727	-91,408	21,727	148,592	21,727	0,877	3,8798	8
U5	21,41	28,647	21,407	-91,353	21,407	148,647	21,407	1,197	5,2955	12
U6	20,98	28,368	20,984	-91,632	20,984	148,369	20,984	1,62	7,1669	16
U7	20,72	28,208	20,716	-91,792	20,716	148,208	20,716	1,888	8,3525	19
U8	20,56	28,115	20,564	-91,885	20,564	148,115	20,564	2,04	9,025	21
U10	20,37	27,995	20,367	-92,005	20,367	147,995	20,367	2,237	9,8965	25
U11	20,35	27,984	20,352	-92,016	20,352	147,984	20,352	2,252	9,9628	26

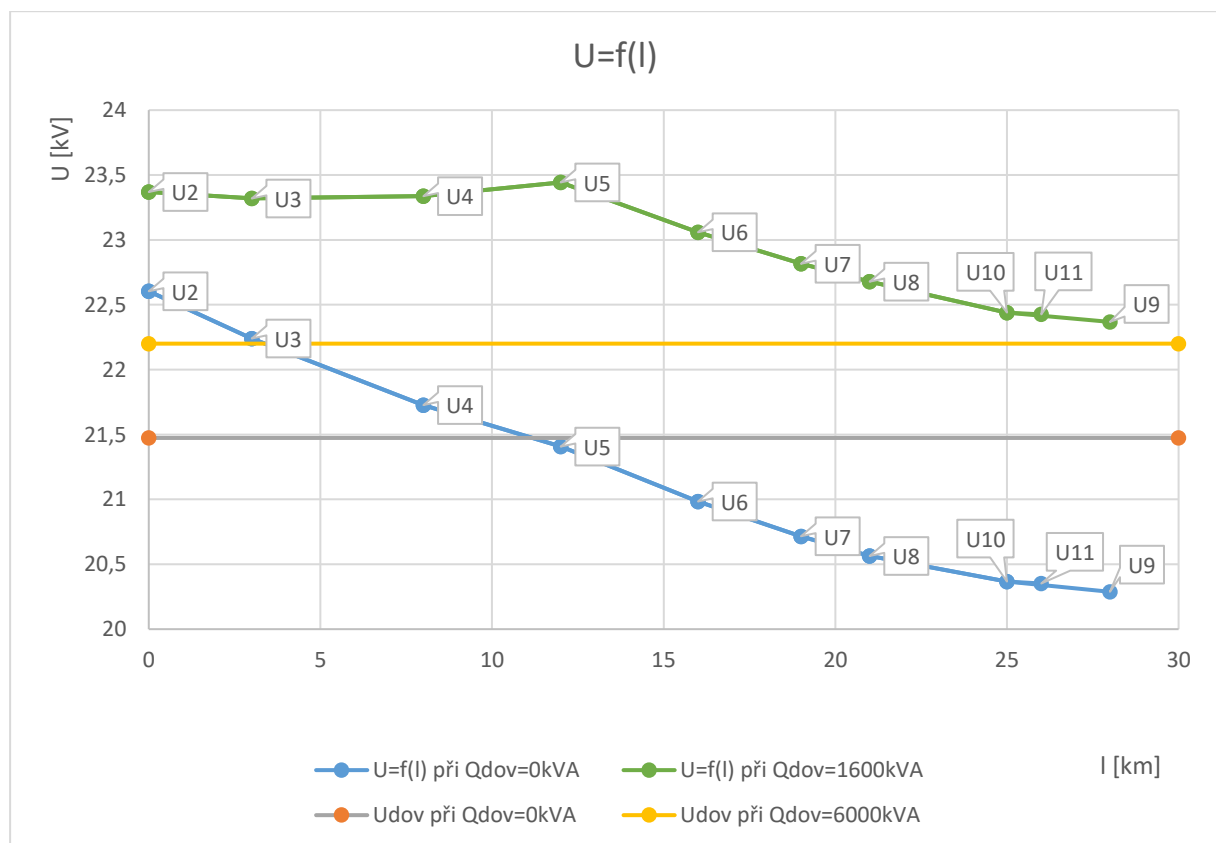
V tab. 3.3.2-35 si můžeme všimnout, že úbytek napětí dosahuje 10,246 % v nejvzdálenějším bodě. Překračuje dovolenou hodnotu 5 %. Tento problém můžeme vyřešit tím, že synchronní generátor bude běžet v režimu synchronního kompenzátoru. Bude do sítě dodávat převážně jalový výkon. Ve schématu klikneme na ikonu synchronního generátoru. V menu vpravo „Vlastnosti prvku“ sjedeme dolů a zaškrtneme pole „Zadat Qprov“ a do pole pod ním zadáme hodnotu jalového výkonu. Hodnotu dodávaného jalového výkonu nejlépe zjistíme tak, že budeme postupně volit hodnoty, dokud úbytek napětí bude menší než dovolená hodnota. Tento krok nyní přeskočíme a zapíšeme hodnotu 6000 kVA. Provedeme výpočet ustáleného chodu sítě.



Obr. 3.3.6-11 DNCalc-Výpočet chodu sítě při odpojeném napájecím vedení V7 a při dodávce Q = 6000 kVar synchronním generátorem

Tab. 3.3.6-21 Napěťové poměry v síti při odpojeném napájecím vedení V7 a při dodávce $Q = 6000 \text{ kVar}$ synchronním generátorem

Při $P_n=1600\text{kW}$, $Q_{dov}=6000\text{kVA}$				Poměry v uzlech						
	$U_a \text{ [kV]}$	$\alpha_a \text{ [}^\circ\text{]}$	$U_b \text{ [kV]}$	$\alpha_b \text{ [}^\circ\text{]}$	$U_c \text{ [kV]}$	$\alpha_c \text{ [}^\circ\text{]}$	$U \text{ [kV]}$	$\Delta U \text{ [kV]}$	$\Delta U \text{ [%]}$	$l \text{ [km]}$
U2	23,369	28,529	23,369	-91,471	23,369	148,529	23,369	0	0	0
U3	23,319	27,676	23,319	-92,324	23,319	147,676	23,319	0,05	0,21	3
U4	23,337	26,307	23,337	-93,693	23,337	146,307	23,337	0,032	0,14	8
U5	23,443	25,263	23,443	-94,737	23,443	145,263	23,443	-0,074	-0,32	12
U6	23,059	25,031	23,059	-94,969	23,059	145,031	23,059	0,31	1,33	16
U7	22,816	24,898	22,816	-95,102	22,816	144,898	22,816	0,553	2,37	19
U8	22,678	24,822	22,678	-95,178	22,678	144,822	22,678	0,691	2,96	21
U10	22,44	24,69	22,44	-95,31	22,44	144,69	22,44	0,929	3,98	25
U9	22,368	24,649	22,368	-95,351	22,368	144,649	22,368	1,001	4,28	28
U2	23,369	28,529	23,369	-91,471	23,369	148,529	23,369	0	0	0
U3	23,319	27,676	23,319	-92,324	23,319	147,676	23,319	0,05	0,21	3
U4	23,337	26,307	23,337	-93,693	23,337	146,307	23,337	0,032	0,14	8
U5	23,443	25,263	23,443	-94,737	23,443	145,263	23,443	-0,074	-0,32	12
U6	23,059	25,031	23,059	-94,969	23,059	145,031	23,059	0,31	1,33	16
U7	22,816	24,898	22,816	-95,102	22,816	144,898	22,816	0,553	2,37	19
U8	22,678	24,822	22,678	-95,178	22,678	144,822	22,678	0,691	2,96	21
U10	22,44	24,69	22,44	-95,31	22,44	144,69	22,44	0,929	3,98	25
U11	22,426	24,681	22,426	-95,319	22,426	144,681	22,426	0,943	4,04	26



Obr. 3.3.6-12 Závislost $U=f(l)$ při odpojeném napájecím vedení V7 a při různém Q zdroje

V grafu na obr. 3.3.2-33 vidíme, že při dodávce jalového výkonu synchronním generátorem do sítě, dojde ke zlepšení napěťových poměrů v síti při výpadku vedení V7. Vlivem rozdílných toků jalových výkonů dojde i ke změně zatížení jednotlivých vedení.

Tab. 3.3.6-22 Zatížení jednotlivých vedení při odpojení napájecím vedení V7 a při dodávce $Q = 6000$ kVAr synchronním generátorem

Poměry ve větvích										
	Uzel	I_a [A]	α_a [°]	I_b [A]	α_b [°]	I_c [A]	α_c [°]	$I_{stř}$ [A]	I_{max} [A]	I_z [%]
V1	U2	115,663	37,914	115,663	-82,086	115,663	157,914	115,7	225	51,406
	U3	115,645	-142,097	115,645	97,904	115,645	-22,097	115,6	225	51,398
V2	U3	110,289	46,784	110,289	-73,216	110,289	166,784	110,3	225	49,017
	U4	110,253	-133,233	110,253	106,767	110,253	-13,233	110,3	225	49,001
V3	U4	108,597	57,814	108,597	-62,186	108,597	177,814	108,6	225	48,265
	U5	108,563	-122,196	108,563	117,804	108,563	-2,196	108,6	225	48,25
V4	U5	103,193	-34,632	103,193	-154,632	103,193	85,368	103,2	225	45,864
	U6	103,212	145,349	103,212	25,349	103,212	-94,651	103,2	225	45,872
V5	U6	82,031	-34,687	82,031	-154,687	82,031	85,313	82,03	225	36,458
	U7	82,045	145,296	82,045	25,296	82,045	-94,704	82,05	225	36,464
V6	U7	69,509	-34,715	69,509	-154,715	69,509	85,285	69,51	225	30,893
	U8	69,528	145,258	69,528	25,258	69,528	-94,742	69,53	225	30,901
V8	U9	24,358	145,107	24,358	25,107	24,358	-94,893	24,36	225	10,826
	U10	24,344	-34,836	24,344	-154,836	24,344	85,164	24,34	225	10,82
V9	U10	14,356	-33,612	14,356	-153,612	14,356	86,388	14,36	225	6,3804
	U11	14,364	146,323	14,364	26,323	14,364	-93,677	14,36	225	6,384
V10	U8	60,243	-34,928	60,243	-154,928	60,243	85,072	60,24	225	26,775
	U10	60,262	145,041	60,262	25,041	60,262	-94,959	60,26	225	26,783

Tab. 3.3.6-23 Zatížení transformátoru při odpojení napájecím vedení a při dodávce $Q = 6000$ kVAr synchronním generátorem

Poměry v transformátoru										
	Uzel	I_a [A]	α_a [°]	I_b [A]	α_b [°]	I_c [A]	α_c [°]	$I_{stř}$ [A]	I_n [A]	I_z [%]
Tr1	U1	25,525	25,571	25,525	-94,429	25,525	145,571	25,53	131	19,485

3.3.7 Ekonomické zhodnocení

g) Zpracujte ekonomické hodnocení zadané sítě. Výstup bude obsahovat specifikace zařízení sítě a výpočet investičních nákladů. Také bude obsahovat tabulky ekonomického hodnocení navržené varianty sítě na základě NPV.

Tento bod zadání zpracujeme pomocí excel souboru, který najdete v příloze pod názvem Ekonomické zhodnocení 2021.xls. Jedná se o předpřipravený výpočtový program, který nám značně usnadní práci. Otevřeme program a na prvním listu „materiál“ máme výpis materiálu. Z toho výpisu sestavíme naši specifikaci materiálu. Ze seznamu zvolíme ty položky, které se v našem návrhu vyskytují. Dále provedeme přepočty na konečné hodnoty. Například vedení je zde uvedeno v měrných nákladech, taktéž výroba elektrické energie. Tyto hodnoty vynásobíme délkou vedení a výkonem synchronního generátoru. Výsledná podoba bude viz tab. 3.3.2-39

Tab. 3.3.7-1 Ekonomické zhodnocení-Specifikace materiálu

Specifikace materiálu		
Položka	Odpisová skupina	Investiční náklady [tis. Kč]
Transformovna 110/220 kV:		
stanoviště transformátoru 2x	5	3000
budova	5	5000
stanoviště zhášecí tlumivky 2x	5	500
TR 110/22 KV ,25 MVA (2x - jeden záložní)	3	13000
pole přívodní 2x	3	6500
pole přívodu k transformátoru 2x	3	5500
pole spojky 1x	3	400
ochrana a měření vvn	1	3000
ochrana a měření vn ,řídící systém	1	5000
ostatní (ovl. skříň TR, kabeláž, lano Alfe, přípojnice)	3	4000
skříňový rozvaděč vn 3x	3	1500
zhášecí tlumivka 2x	3	650
zařízení pro vlastní spotřebu	3	4000
Výroba el. energie:		
Synchronní generátor včetně doprovodných komponentů	4	80000
Vedení 22 kV kabelové:		
Al kabel 22 kV, průřez 70mm ²	4	19800

Provedeme součet investičních nákladů podle odpisových skupin:

$$N_{i1} = 3000 \cdot 10^3 + 5000 \cdot 10^3 = 8 \text{ mil. Kč}$$

$$N_{i3} = 13000 \cdot 10^3 + 6500 \cdot 10^3 + 5500 \cdot 10^3 + 400 \cdot 10^3 + 4000 \cdot 10^3 + 1500 \cdot 10^3 + 650 \cdot 10^3 + 4000 \cdot 10^3 = 35,55 \text{ mil. Kč}$$

$$N_{i4} = 80000 \cdot 10^3 + 19800 \cdot 10^3 = 99,8 \text{ mil. Kč}$$

$$N_{i5} = 3000 \cdot 10^3 + 5000 \cdot 10^3 + 500 \cdot 10^3 = 8,5 \text{ mil. Kč}$$

Tyto hodnoty společně se ztráty v síti při chodu synchronního generátoru $\Delta P = 83,34 \text{ kW}$, výkonem $P = 1600 \text{ kW}$ a celkovým zatížením sítě $P_{celk} = 5,844 \text{ MW}$ využijeme při výpočtu NPV. Celkové zatížení sítě vypočteme jako součet činných výkonů v uzlu. Klikneme v excelu na list „NPV – 2“ a doplníme vypočtené hodnoty do zeleně označených buněk.

Tab. 3.3.7-2 Ekonomické zhodnocení-Přehled zadaných hodnot

Celkové investiční náklady (Nic)	152	mil. Kč
Celkové činné ztráty (dPz)	0,0833	MW
Inv. náklady - 1.odpis. skup. (Ni1)	8,00	mil. Kč
Inv. náklady - 3.odpis. skup. (Ni3)	35,55	mil. Kč
Inv. náklady - 4.odpis. skup. (Ni4)	99,80	mil. Kč
Inv. náklady - 5.odpis. skup. (Ni5)	8,50	mil. Kč
Celkové zatížení (Pcelk)	5,84	MW

Tab. 3.3.7-3 Ekonomické zhodnocení-Doba využití maxima a doba plných ztrát

T_m	5000	h
T_z	3283	h

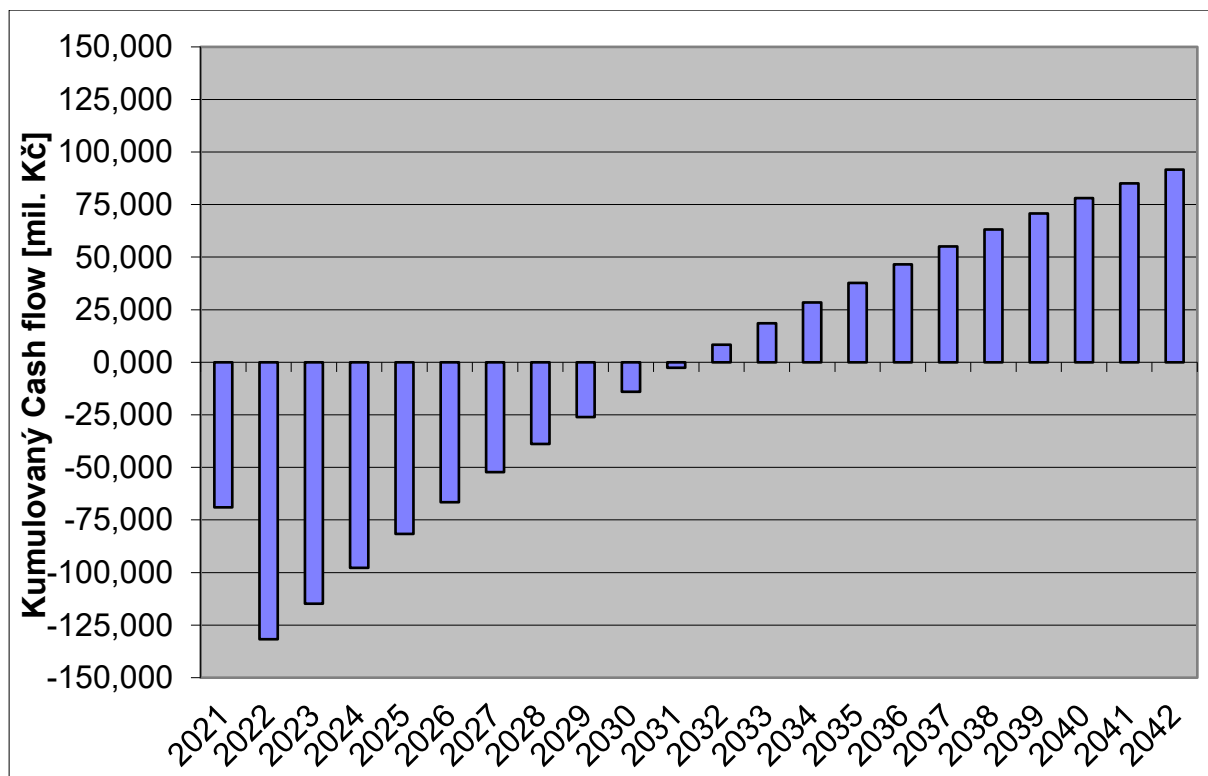
Tab. 3.3.7-4 Ekonomické zhodnocení-Parametry využití při výpočtu

trend růstu zatížení	1,005	-
trend růstu odbyt.ceny el.en.	1,04	-
odbytová cena el.en. v roce 2021	2047	Kč/MWh
trend růstu ceny opatřené el.en.	1,03	-
cena opatřené el.en. v roce 2021	1547	Kč/MWh
náklady na provoz, opravy a údržbu	0,8	% z Nic
trend růstu náklady na provoz, ...	1,085	-
Diskontní sazba (ún)	10	%
Daň z příjmu	19	%
Výkon zdroje	1,60	MW

Po dosazení hodnot se provede výpočet. Zobrazíme výsledek výpočtu.

$$NPV = 91,695$$

Celý výpočet NPV pak najdete v příloze.



Obr. 3.3.7-1 Ekonomické zhodnocení-Peněžní toky v jednotlivém období

- a) Stanovte důležitost těchto čtyř kritérií: $f_1(NPV)$, $f_2(\Delta P)$, $f_3(P_{zdroje})$, $f_4(\Delta U_{max\%})$ metodou Fullerova trojúhelníku. Poté sestrojte kritériální matici z variant (1A až 4A nebo 1B až 4B nebo 1C až 4C, etc.) dle zadání. Pomocí metody váženého součtu (WSA) ji převeďte na normalizovanou kritériální matici a stanovte pořadí jednotlivých variant.

Sestavíme pořadí a váhu jednotlivých variant párovým porovnáním pomocí trojúhelníka párů. Výsledek bude u každého odlišný, jelikož porovnání je subjektivní a každý může upřednostnit jiná kritéria.

$\begin{matrix} \textcircled{f_1} & f_1 & \textcircled{f_1} \\ f_2 & \textcircled{f_3} & f_4 \end{matrix}$	$v_{NPV} = \frac{3}{6} = 0,3\overline{3}$
<hr style="width: 50%; margin: 10px auto;"/>	$v_{\Delta P} = \frac{1}{6} = 0,1\overline{6}$
$\begin{matrix} & f_2 & \textcircled{f_2} \\ & \textcircled{f_3} & f_4 \end{matrix}$	$v_{P_{zdroje}} = \frac{3}{6} = 0,3\overline{3}$
<hr style="width: 50%; margin: 10px auto;"/>	$v_{\Delta U_{max\%}} = \frac{0}{6} = 0$
$\begin{matrix} & & \textcircled{f_3} \\ & & f_4 \end{matrix}$	

Nejvyšší váha vyšla pro kritérium čisté současné hodnoty a činný výkon zdroje.

Sestavíme kritériální matici:

$$\begin{bmatrix} 91,695 & 83,34 & 1,6 & 2,86 \\ 86,408 & 83,123 & 1,1 & 2,30 \\ 90,249 & 108,191 & 1,55 & 3,12 \\ 85,071 & 191,183 & 1,35 & 3,12 \end{bmatrix}$$

Varianty:

$a_1 = \text{Varianta 1A}$
 $a_2 = \text{Varianta 2A}$
 $a_3 = \text{Varianta 3A}$
 $a_4 = \text{Varianta 4A}$

Kritérium:

$f_1(NPV) = 91,695 \rightarrow \max$
 $f_2(\Delta P) = 83,34 \text{ kW} \rightarrow \min$
 $f_3(P_{zdroje}) = 1,6 \text{ MW} \rightarrow \max$
 $f_4(\Delta U_{max\%}) = 2,86 \rightarrow \min$

Využijeme vzorců (1.6.2-2) a (1.6.2-3) pro získání normalizované kritériální matice

$$\begin{bmatrix} 1 & 0,99 & 1 & 0,3 \\ 0,2 & 1 & 0 & 1 \\ 0,78 & 0,77 & 0,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 \end{bmatrix}$$

Užitek variant pak spočítáme dle vzorce (1.6.2-4). Normalizovanou matici vynásobíme váhami, sestavenými v minulém bodě.

$$u(a_1) = 0,499$$

$$u(a_2) = 0,233$$

$$u(a_3) = 0,689$$

$$u(a_4) = 0,166$$

Nejvhodnější varianta, dle našich kritérií je varianta č. 1 (1A).

4 Výpočet zkratových poměrů v síti

V poslední kapitole představím možnosti výpočtu zkratových poměrů v síti pomocí programu DNCalc. Tyto možnosti budu demonstrovat na zadaném příkladu podobně jako v předchozí kapitole. Projdeme si krok za krokem, jak zadanou úlohu převést do prostředí DNCalc, respektive namodelovat jednotlivé prvky sítě a zadat hodnoty do programu. Následně vám představím postup výpočtu v programovém prostředí.

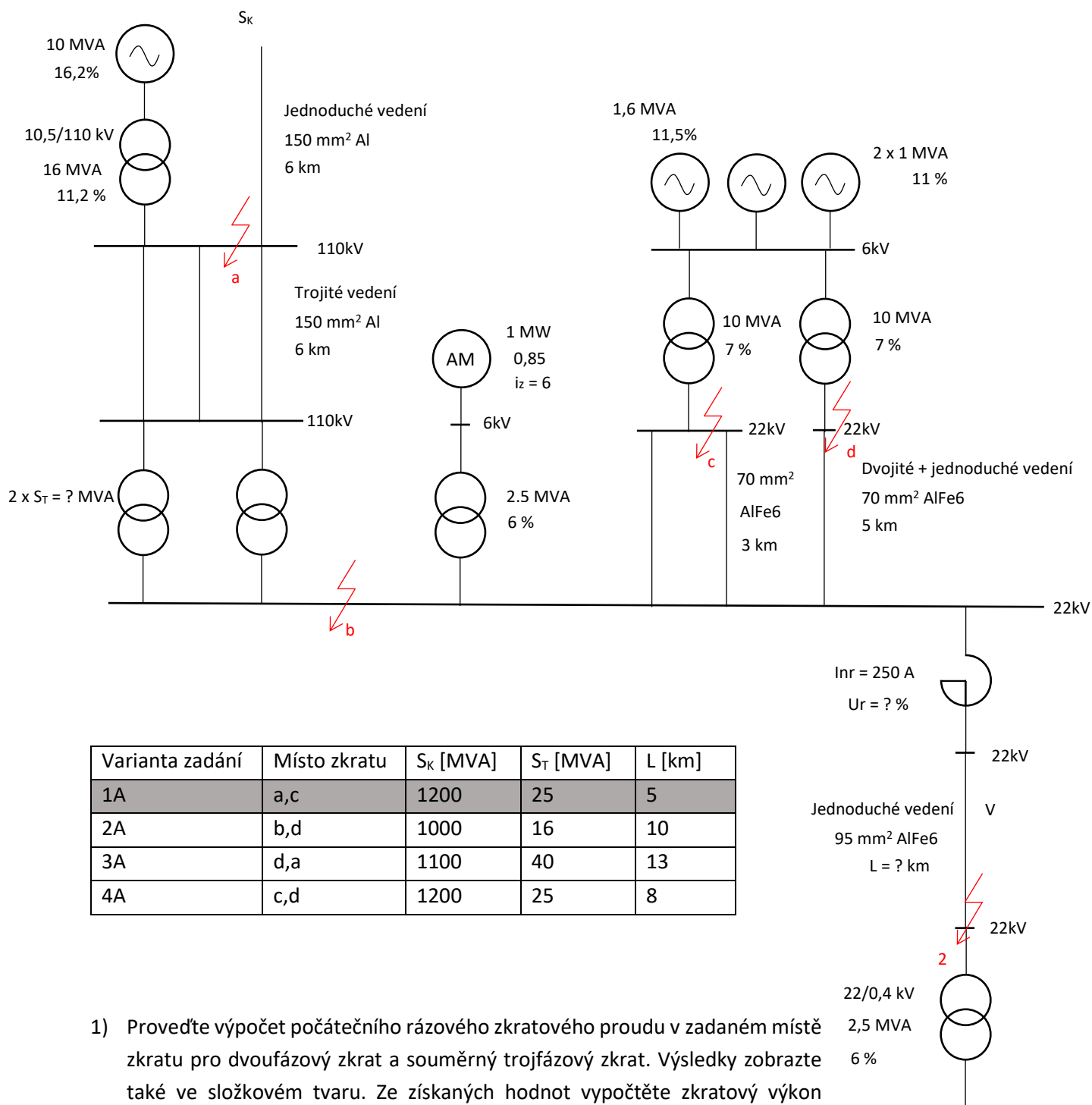
4.1 Zadání

Předmětem zadání, které najdete na následující straně, je vypočítat počáteční rázový zkratový proud pro souměrný trojfázový zkrat a jednofázový zkrat v zadaném místě poruchy pomocí programu DNCalc. Ze získaných hodnot poté student vypočte zkratový výkon v místě zkratu. V druhé části úkolu je zapotřebí vypočítat impedanční napětí reaktoru, a to takové, aby došlo ke snížení zkratového výkonu nejméně o 30 % v místě trojfázového souměrného zkratu za reaktorem a před distribučním transformátorem 22/0,4kV.

4.1.1 Popis obvodu

Síť se skládá z několika napěťových hladin. Nejvyšší 110kV, která je považována jako napájecí a na kterou jsou připojeny tři transformátory. Z toho dva slouží k transformaci napětí 110/22 kV s napětím nakrátko $u_k=11\%$ a třetí pro transformaci napětí 110/10,5 kV, který slouží pro připojení synchronního generátoru dodávajícího 10MVA výkonu do sítě s $x''_d=16,2\%$. Vedení na této napěťové hladině je z hliníku o průřezu 150 mm². Z napěťové hladiny je vedeno hned několik odboček. Jedna odbočka obsahuje transformátor 110/6,3 kV o výkonu 2,5 MVA a $u_k=6\%$, který napájí asynchronní motor o příkonu 1 MW, účinnosti $\cos\phi = 0,85$ a $i_z=6$. Další odbočka je tvořena dvojitým a jednoduchým vedením AlFe6 o průřezu 70 mm². Na konci těchto vedení se nachází transformátory 22/6,3 kV o výkonech 4MVA a 10 MVA, s napětím nakrátko 6 % a 7 %. Sekundární vinutí obou transformátorů je přivedeno na společnou přípojnicí o napětí 6,3 kV. Na tuto přípojnicí jsou připojeny tři asynchronní generátory. První o výkonu 1,6 MVA s $x''_d=11,5\%$ a zbylé dva o výkonu každý 1 MVA s $x''_d=11\%$. Poslední odbočka obsahuje reaktor se jmenovitým proudem 250 A, dále venkovní vedení AlFe6 o průřezu 95 mm² a distribuční transformátor 22/0,4 kV o výkonu 2,5 MVA, $u_k=6\%$.

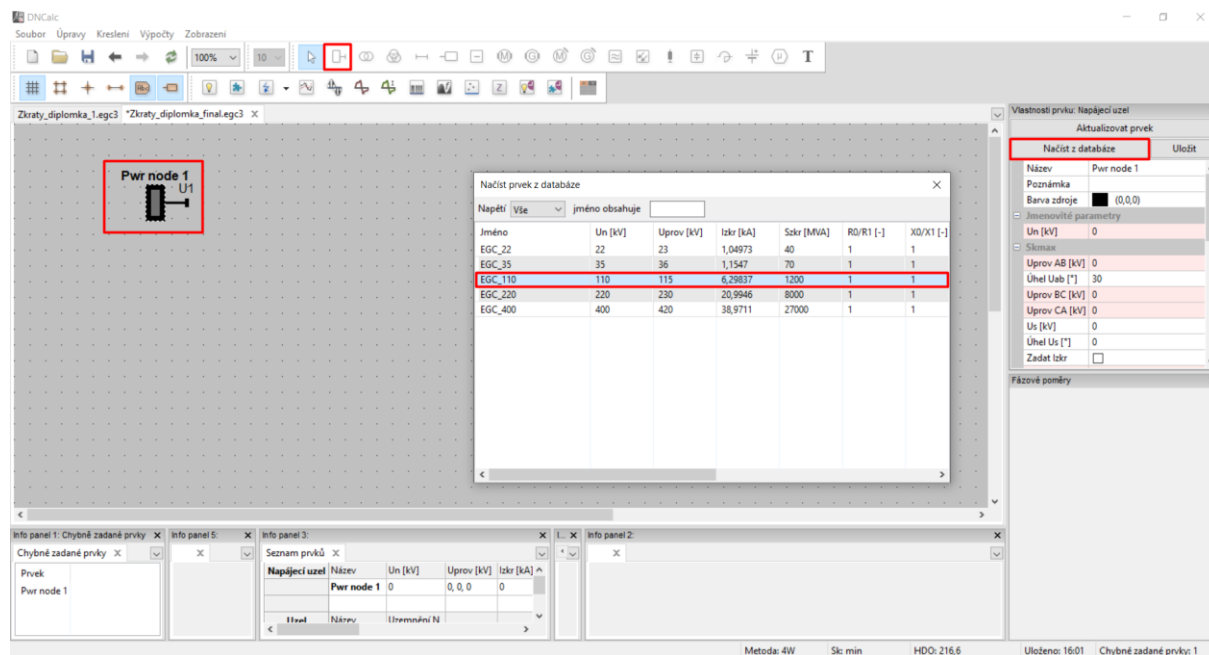
Zkraty v síti



- 1) Provedte výpočet počátečního rázového zkratového proudu v zadaném místě zkratu pro dvoufázový zkrat a souměrný trojfázový zkrat. Výsledky zobrazte také ve složkovém tvaru. Ze získaných hodnot vypočtete zkratový výkon v uzlu.
- 2) V dalším úkolu provedte návrh reaktoru v odbočce k distribučnímu transformátoru tak aby v místě souměrného trojfázového zkratu poklesl zkratový výkon o 30 %.
- 3)

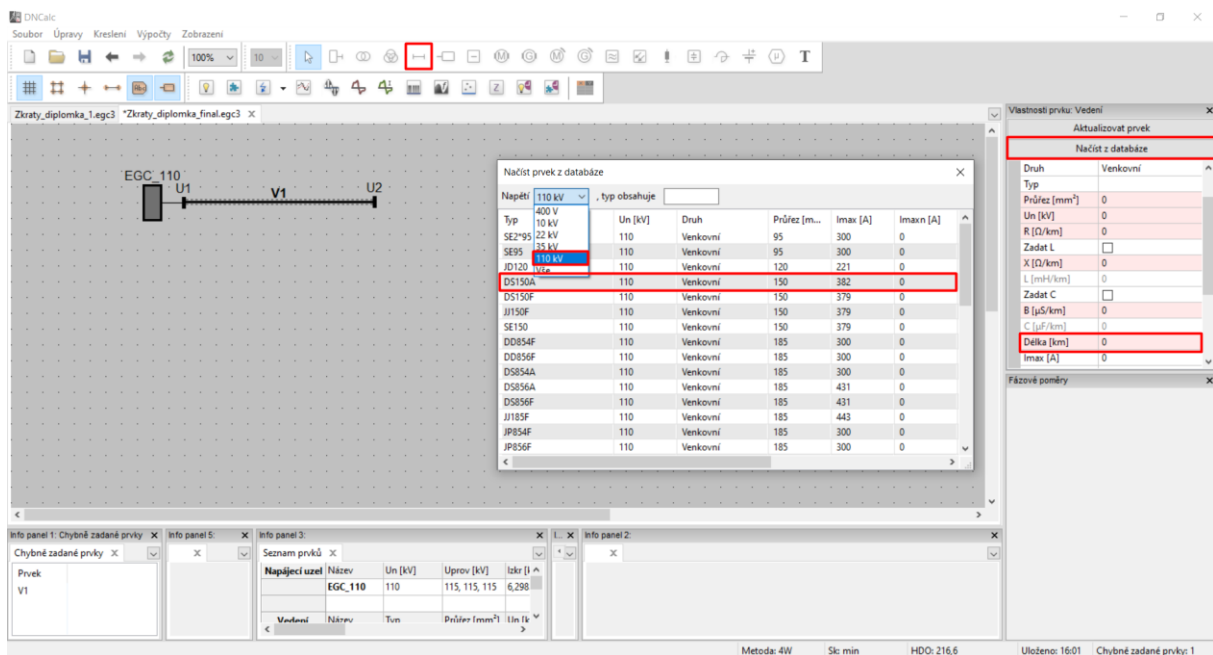
4.1.2 Modelování zadané úlohy v programu DNCalc

Stejně jako v předchozí úloze, než začneme provádět výpočty ve zmíněném programu, musíme danou síť namodelovat. V následujících krocích vysvětlím postup modelování sítě, a poté provedeme výpočet dle hodnot zadaných ve variantě 1A. Otevřeme program DNCalc a vytvoříme nový projekt. V horní liště prvků zvolíme „Napájecí uzel“ a klikneme do volného prostoru. Na pracovní ploše se objeví napájecí uzel. Klikneme na tento prvek a vpravo v záložce „Vlastnosti prvků“ klikneme na „Načíst z databáze“, načte se nové okno, ve kterém zvolíme příslušnou napěťovou hladinu. V tomto případě 110 kV. Výběr potvrdíme tak, že na tuto možnost dvakrát klikneme tlačítkem myši.



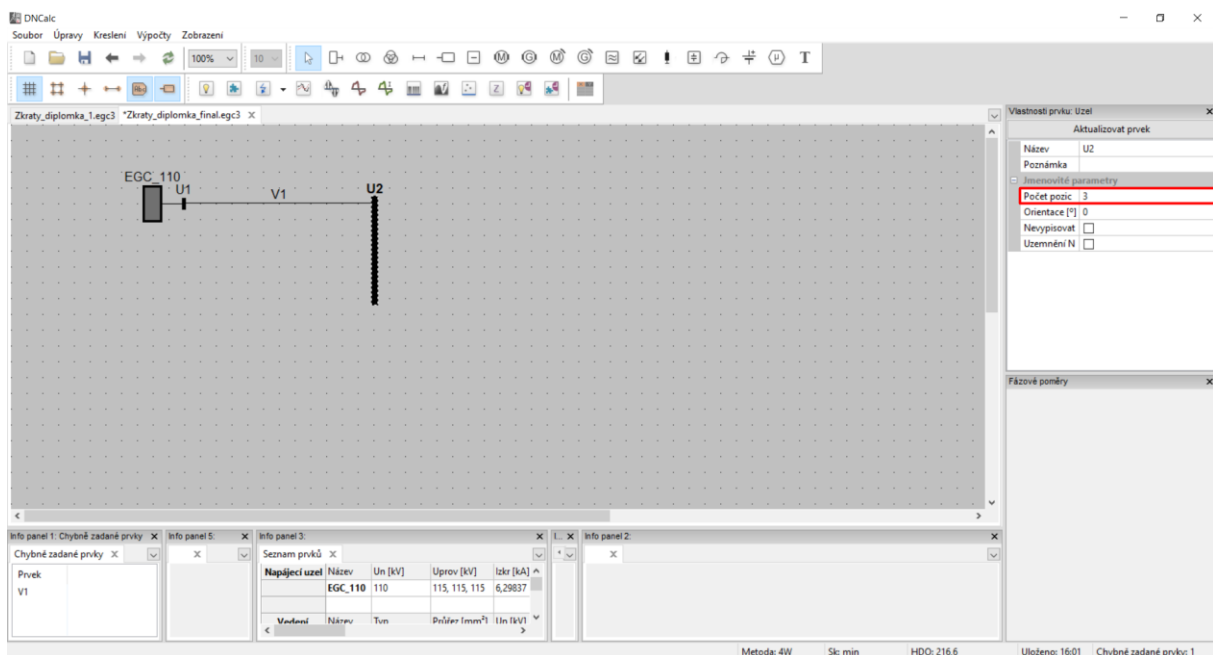
Obr. 4.1.2-1 DNCalc-Modelování napájecího uzlu

Vedení vložíme tak, že klikneme na uzel U1 a poté vybereme „Vedení“ v liště „Prvků“ v horní části obrazovky. Poté klikněte na libovolné místo pracovní plochy, tím se vytvoří uzel U2, který ukončuje vedení. Označíme vedení V1, tak že na něj klikneme, a v záložce „Vlastnosti prvků“ umístěné v pravé části obrazovky, zvolte „Načíst z databáze“. Objeví se nové okno, ve kterém zvolíme příslušnou napěťovou hladinu (110 kV) a vybereme typ vedení. V tomto případě se jedná o vedení typu DS150A. Nezapomeňme ještě v záložce „Vlastnosti prvků“ doplnit délku vedení viz obr. 4.1.2-2



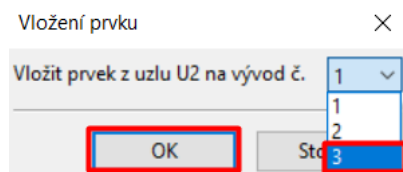
Obr. 4.1.2-2 DNCalc-Modelování vedení

Nyní potřebujeme připojit více odboček na jeden uzel. To uděláme tak, že klikneme na uzel U2 a v záložce „Vlastnosti prvku“ změníme počet pozic z 1 na 3.



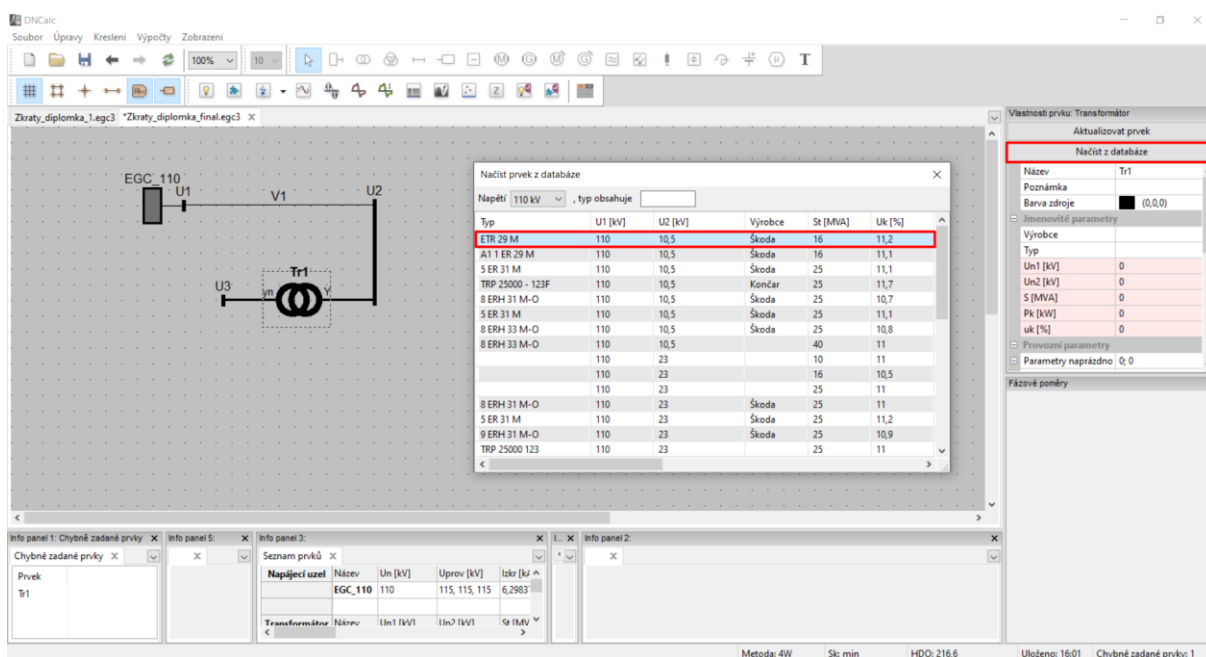
Obr. 4.1.2-3 DNCalc-Modelování přípojnice

Po rozšíření počtu pozic přidáme do sítě transformátor sloužící pro transformaci napětí a přenosu výkonu ze synchronního generátoru. Klikneme na uzel U2 a v horní liště „Prvků“ vybereme prvek „Transformátor“. Druhý uzel se vytvoří tam, kde klikneme tlačítkem myši. Ještě předtím ale na nás vyskočí okno „Vložení prvku“, které se nás ptá, na který vývod v uzlu se má transformátor napojit. My zvolíme vývod č. 3.



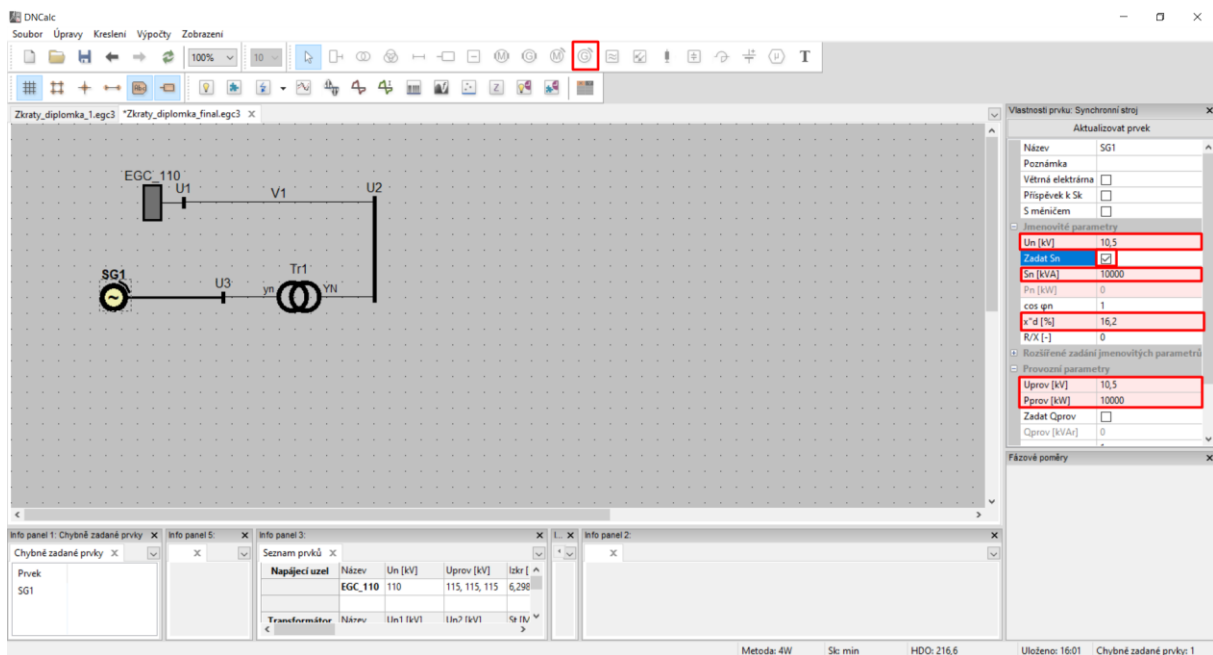
Obr. 4.1.2-4 DNCalc-Dialogové okno "Vložení prvku"

Klikneme na transformátor a v záložce „Vlastnosti prvku“ zvolíme „Načíst z databáze“ a vybereme typ transformátoru dle zadání.



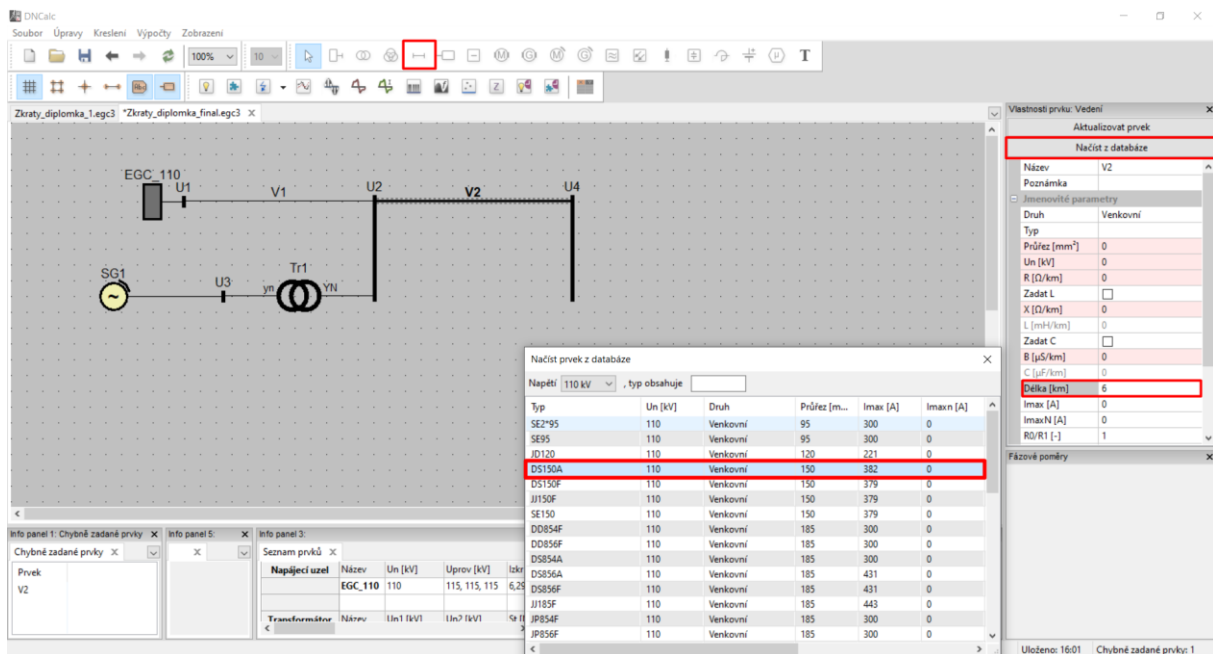
Obr. 4.1.2-5 DNCalc-Modelování transformátoru

Levým tlačítkem myši označíme uzel U3 a v horní liště „Prvků“ zvolíme prvek „Synchronní generátor“ a klikneme levým tlačítkem myši do prostoru. Objeví se ve schématu synchronní generátor. Označíme jej a v záložce „Vlastnosti prvku“ vyplníme údaje dle zadání. Respektive zadáme jmenovitou hladinu napětí poté jmenovitý výkon, který můžeme zadat buďto jako zdánlivý nebo činný. Pokud chceme zadat zdánlivý výkon, musíme odkliknout buňku „Zadat Sn“ a poté se zpřístupní kolonka pro zadání zdánlivého výkonu. Dosadíme ještě subtranzientní reaktanci v podélné ose x''_d [%] a provozní hodnoty napětí a výkonu. Předpokládáme chod při jmenovitých hodnotách.



Obr. 4.1.2-6 DNCalc-Modelování synchronního generátoru

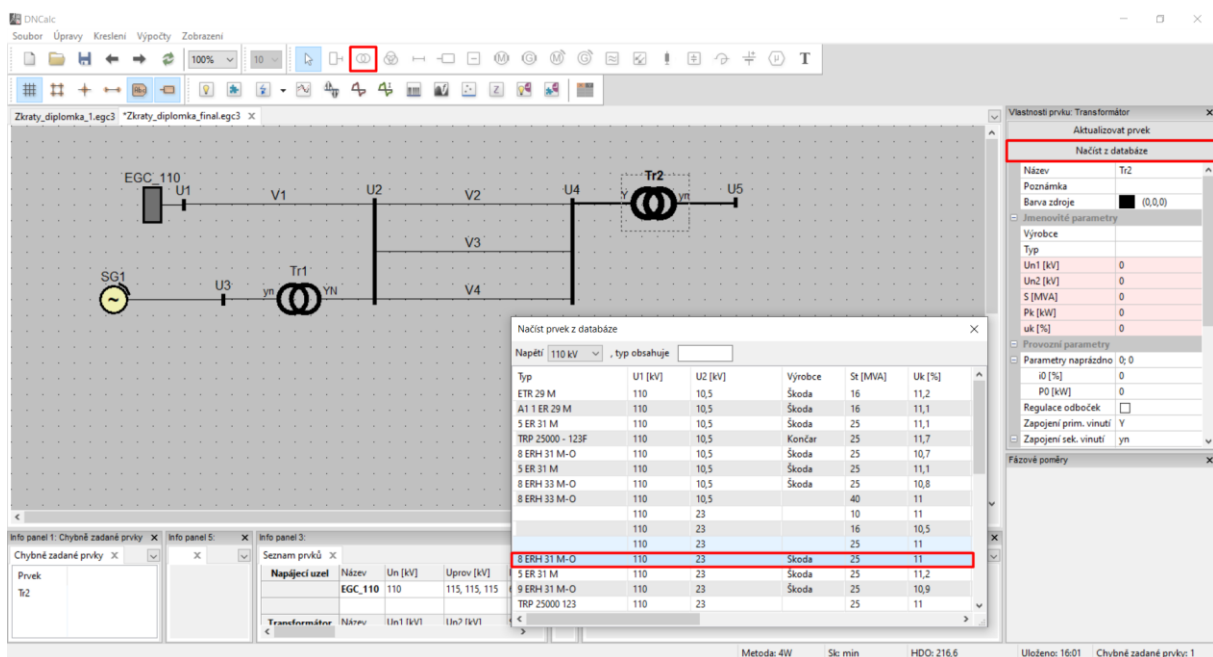
Opět vložíme venkovní vedení stejným způsobem jako přechozí vedení V1. Vzniklý uzel U4 rozšíříme na 3 vývody. Zvolíme typ vedení v záložce „Vlastnosti prvku“ -> „Načíst z databáze“ a doplníme délku. Stejným způsobem budeme postupovat i na zbývajících vedeních na vývodu č. 2 a 3.



Obr. 4.1.2-7 DNCalc-Modelování vedení

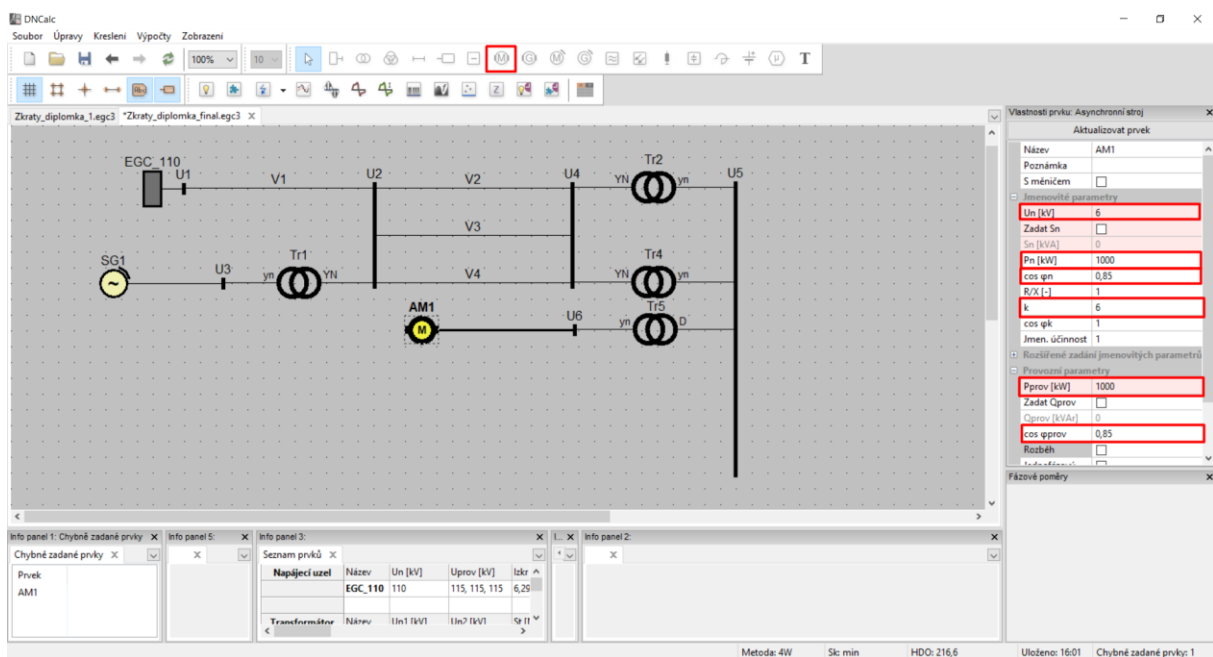
Označíme uzel U4 a vložíme transformátor z lišty „Prvků“. Klikneme tam kde chceme mít uzel ze sekundární strany transformátoru. Na pracovní plochu se vykreslí prvek. Označíme tento prvek a v pravé záložce „Vlastnosti prvku“ zvolíme „Načíst z databáze“. V novém okně vybereme zadaný typ transformátoru a dvojím kliknutím potvrdíme. Nově vzniklý uzel U5 rozšíříme na počet pozic 7. Stejným způsobem konstruujeme i druhý transformátor, který připojíme na 3. vývody uzlů U4 a U5. Nesmíme

zapomenout, že první uzel, který označíme při kreslení prvku je zároveň primární strana transformátoru a druhý uzel tvoří sekundární stranu. Na vývod č. 4 uzlu U5 vložíme také transformátor dle zadání.



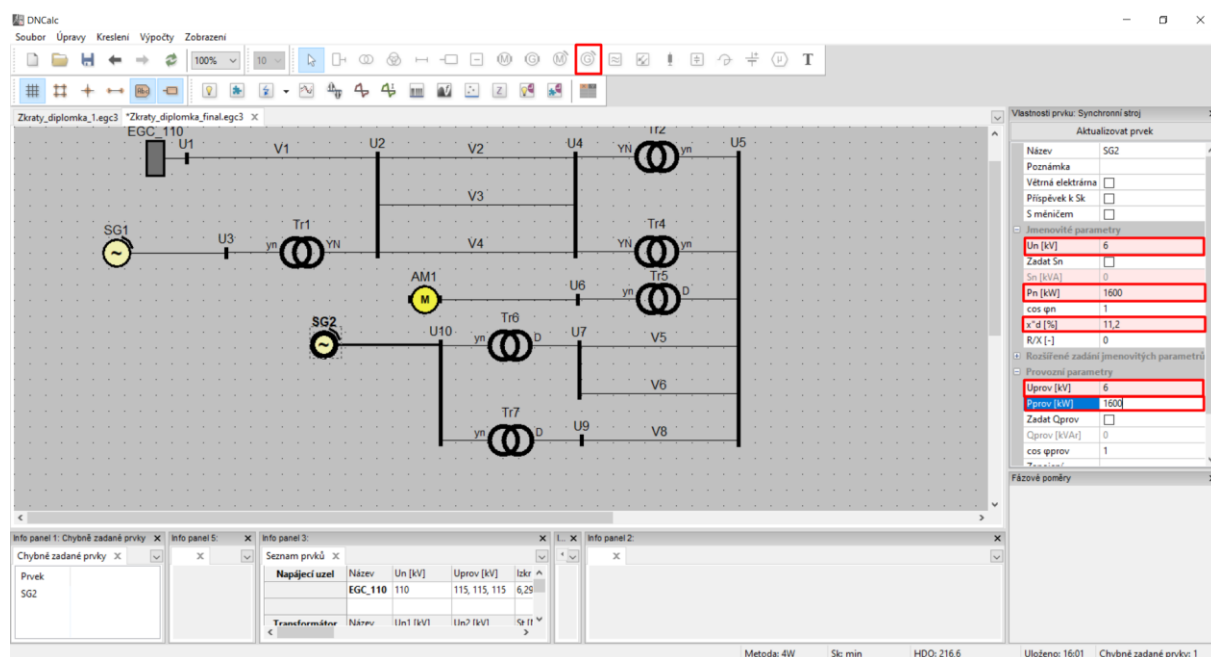
Obr. 4.1.2-8 DNCalc-Modelování transformátoru

Do uzlu U6, který vznikl na sekundárně straně transformátoru, vložíme z horní lišty „Prvků“ asynchronní motor, poté klikneme do prostoru a prvek se zobrazí na pracovní ploše. Na pravé straně, v záložce „Vlastnosti prvku“, vyplníme údaje dle zadání. Jmenovitý výkon, účinník a provozní parametry. Parametr „k“ je poměr I_z a I_n .



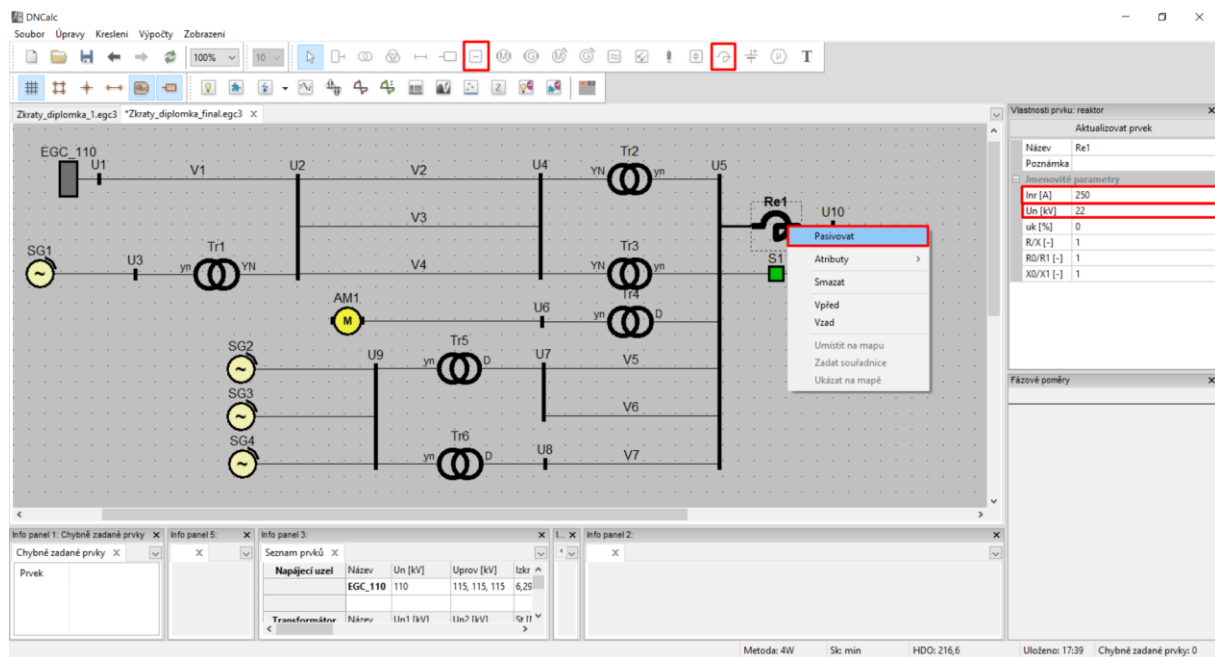
Obr. 4.1.2-9 DNCalc-Modelování asynchronního motoru

Na zbývající vývody č. 5, 6 a 7 uzlu U5, respektive přípojnice, vložíme vedení z horní lišty „Prvků“, poté vybereme z databáze dle zadání a doplníme délky vedení. Vedení V5 a V6, které vznikne na vývodu č.5 a 6 spojíme na konci do jednoho uzlu (přípojnice), a to tak, že nejdříve zkonstruuujeme vedení V5 z uzlu U5 a vzniklý uzel U7 rozšíříme z počtu pozic 1 na 2 a až poté, zkonstruuujeme vedení V6, které napojíme na vývod č. 2 uzlu U7. Na vývod č. 1 uzlu U7 připojíme transformátor a doplníme parametry dle zadání. Následně vzniklý uzel U10 rozšíříme na počet pozic: 3. Taktéž vložíme transformátor do uzlu U9 a spojíme jej s uzlem U10. Nesmíme zapomenout, že primární stranu transformátoru vždy tvoří uzel, který označíme jako první.



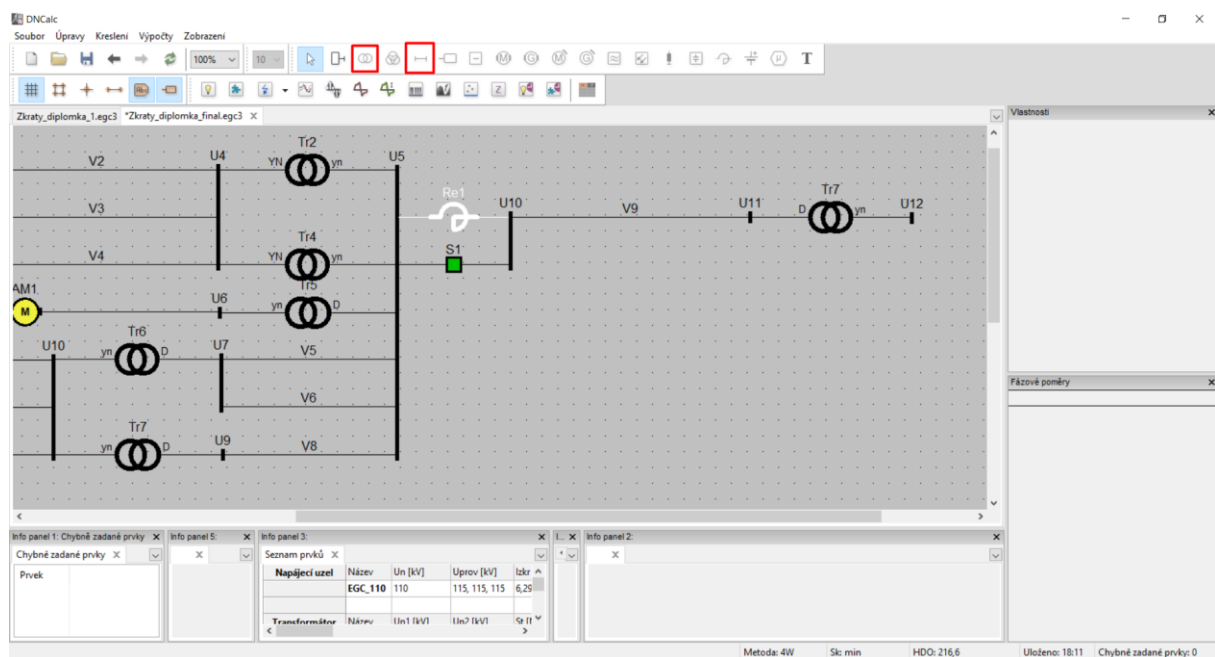
Obr. 4.1.2-10 DNCalc-Modelování sítě, parametry synchronního generátoru

Na všechny vývody uzlu U10 připojíme synchronní generátory, které najdeme v horní liště „Prvků“ a dosadíme zadané hodnoty. V dalším kroku přidáme do sítě reaktor, ale jelikož ještě neznáme přesné parametry reaktoru a které budeme mít za úkol vypočítat, provedeme zapojení takto: Reaktor do sítě vložíme z horní lišty „Prvků“. Na reaktoru můžeme zatím vyplnit jmenovitý proud a jmenovité napětí. Při výpočtu parametrů reaktoru budeme vycházet z výpočtu zkratových poměrů bez použití reaktoru. Proto uzel za reaktorem rozšíříme na počet pozic: 2 a paralelně k reaktoru zkonstruuujeme vypínač. Dvojitým kliknutím na vypínač změni barvu ze zelené na červenou, to znamená, že vypínač je ve vypnutém stavu. Vypínač necháme v sepnutém stavu a na reaktor klikneme pravým tlačítkem myši a zvolíme možnost „Pasivovat“, tím reaktor uložíme na pozadí a další výpočty jej budou ignorovat.



Obr. 4.1.2-11 DNCalc-Modelování reaktoru

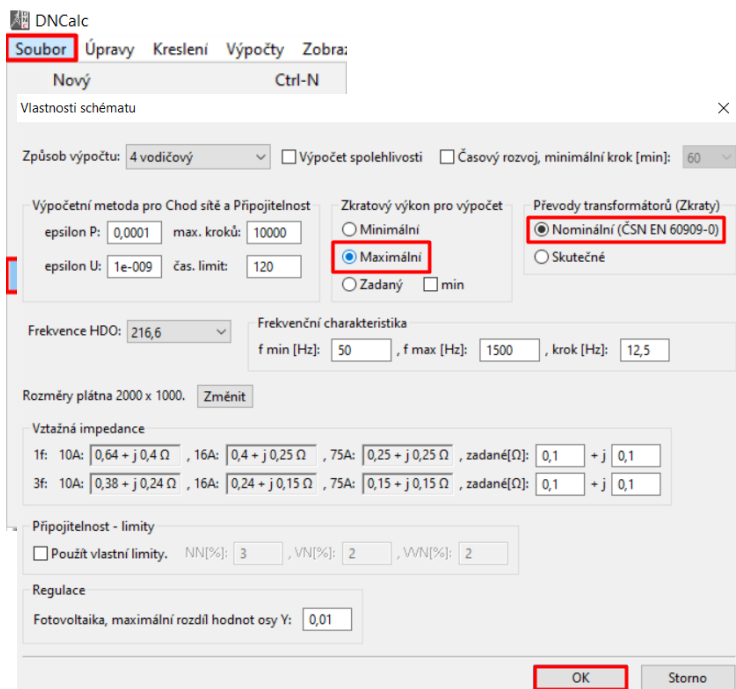
Nakonec na vývod č. 1 uzlu U10 připojíme vedení a distribuční transformátor dle zadání.



Obr. 4.1.2-12 DNCalc-Modelování zbytku vedení

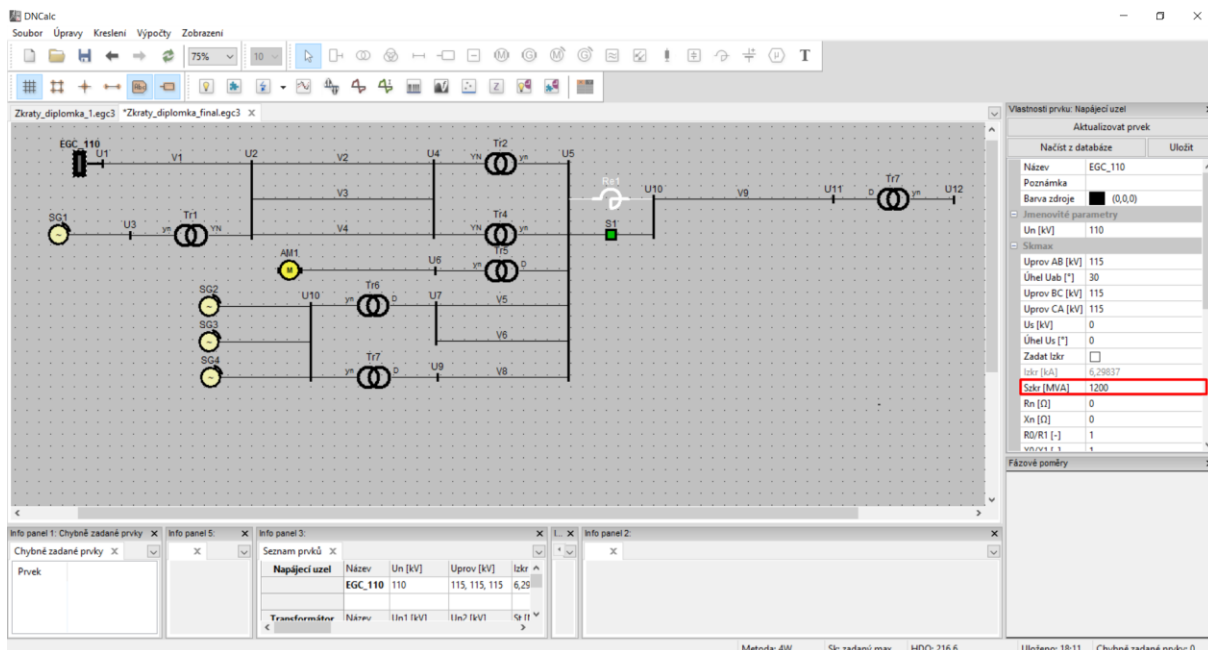
4.1.3 Výpočet a vypracování zadané úlohy v programu DNCalc

Před samotným výpočtem provedeme nastavení hodnot. Přejdeme do vlastností programu, a to buď v horní záložce „Soubor“ -> „Vlastnosti“ anebo klávesovou zkratkou „Ctrl-P“. V novém okně v kolonce „Zkratový výkon pro výpočet“ zvolíme „Maximální“ a potvrdíme výběr.



Obr. 4.1.3-1 DNCalc-Nastavení výpočtu

Ve schématu označíme napájecí uzel a v záložce „Vlastnosti prvku“ zkontrolujeme hodnotu zkratového výkonu S_K , pokud nesouhlasí, tak ji přepíšeme dle zadání.

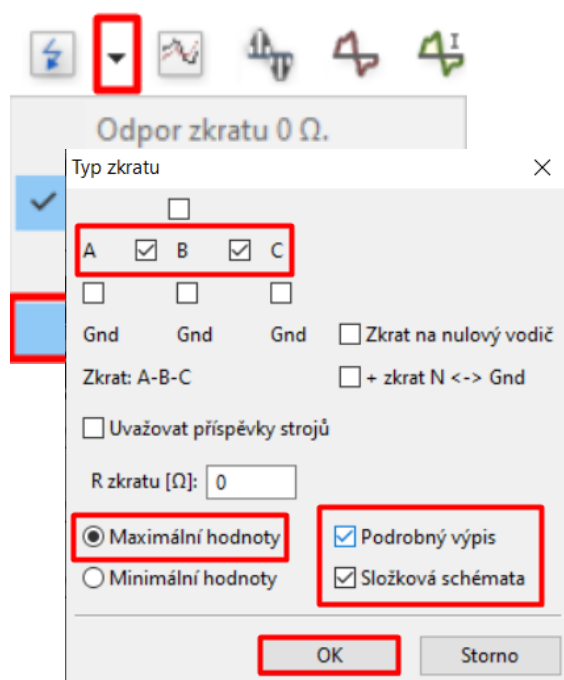


Obr. 4.1.3-2 DNCalc-Kontrola hodnoty zkratového výkonu nadřazené soustavy

- 1) Proveďte výpočet počátečního rázového zkratového proudu v zadaném místě zkratu pro dvoufázový zkrat a souměrný trojfázový zkrat. Výsledky zobrazte také ve složkovém tvaru. Ze získaných hodnot vypočtete zkratový výkon v uzlu.

Varianta zadání	Místo zkratu	S_K [MVA]	S_T [MVA]	L [km]
1A	a,c	1200	25	5

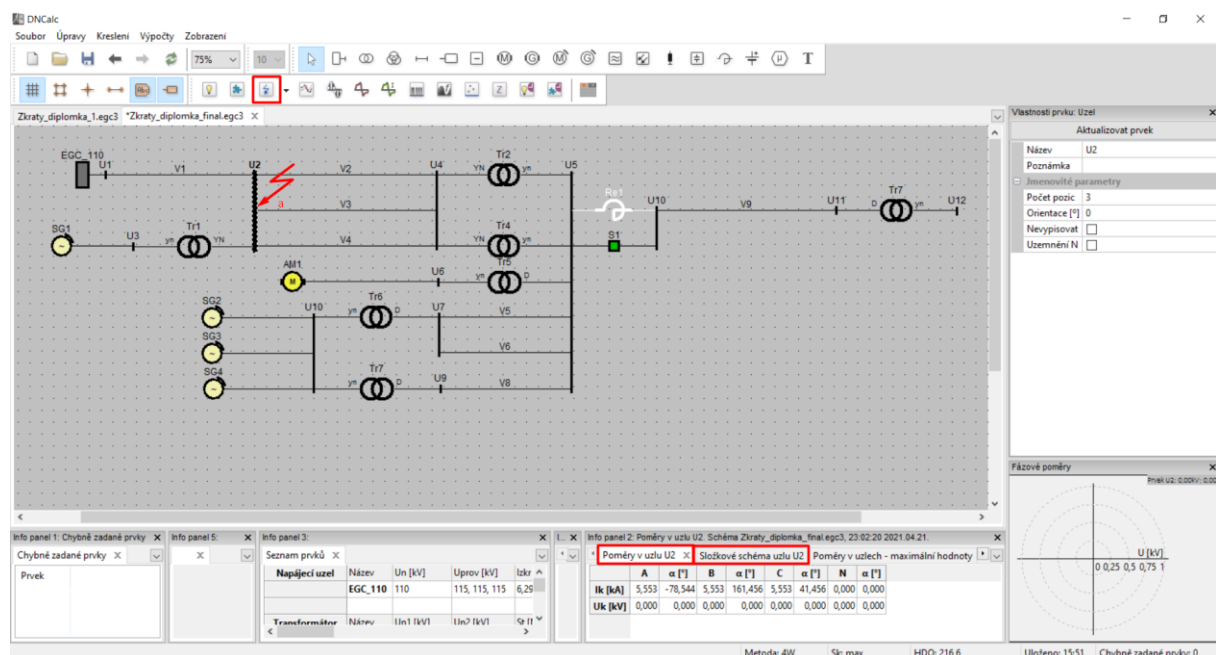
Před výpočtem musíme provést nastavení výpočtu. Tedy jaký zkrat chceme, aby nastal a které parametry má program zobrazit. Do nastavení se dostaneme tak, že na horní liště „Výpočtů“ najdeme ikonku s modrým bleskem, kterou spouštíme výpočet zkratových poměrů, a klikneme na šipku vedle této ikony. V zobrazené nabídce zvolíme možnost „Nastavit“. Otevře se dialogové okno, ve kterém provedeme nastavení. Nejdřív zvolíme typ zkratu a zaškrtneme mezi kterými fázemi má nastat zkrat. Chceme trojfázový, takže mezi všemi kromě GND. Dále zvolíme, že chceme maximální hodnoty a složková schémata.



Obr. 4.1.3-3 DNCalc-Volba a nastavení zkratu

Pro samotný výpočet označíme uzel U2, který odpovídá místu zkratu „a“ a spustíme jej v horní liště „Výpočtů“ nebo klávesovou zkratkou „Ctrl-shift-3“. Po výpočtu najdeme výsledky v záložce „Infopanel 2“, který se nachází v pravé části dolní obrazovky. Výsledky zkopírujeme do sešitu v excelu, kde je po zformátování přeneseme zpět zde v tabulkové podobě. Zkopírovat výsledky můžeme dvěma způsoby, a to buď kliknutím pravým tlačítkem myši na hlavičku záložky např. „Poměry v uzlu U2“ a zvolit možnost „Kopírovat výsledky“ a poté je vložit do excelu. Tím zkopírujeme celý výpočet. Pokud

chceme jen jeho část, tak ji stačí označit (daná oblast zmodrá) a poté použít klávesové zkratky „Ctrl-v“ a „Ctrl-c“.



Obr. 4.1.3-4 DNCalc-Výpočet zkratových poměrů v zadaném místě pro trojfázový zkrat

Pod námi můžeme vidět výsledky výpočtu pro trojfázový zkrat v místě zkratu „a“ na napěťové hladině 110 kV dle zadání. V tab. 4.1.3-1 je vyobrazen počáteční rázový zkratový proud, který je roven hodnotě $I''_{k3} = 5\,553\text{ kA}$ a napětí v uzlu v době zkratu, které je rovno $U_k = 0\text{ V}$ ve všech fázích. V tab. 4.1.3-2 máme převod do složkového tvaru pomocí Fortescuovy transformace. V tomto případě se jedná o souměrný zkrat, složkové schéma obsahuje pouze souslednou složku. V posledním řádku je zobrazena zkratová impedance do místa zkratu ve složkovém tvaru.

Tab. 4.1.3-1 Hodnoty napětí a proudu v místě trojfázového zkratu „a“

Poměry v uzlu U2								
	A	α [°]	B	α [°]	C	α [°]	N	α [°]
I_k [kA]	5,553	-78,544	5,553	161,456	5,553	41,456	0	0
U_k [kV]	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.1.3-2 Rozklad na souměrné složky

Složkové schéma uzlu U2						
	sousledná	α [°]	zpětná	α [°]	netočivá	α [°]
I_{ksym} [kA]	5,553	-78,544	0	0	0	0
U_{ksym} [kV]	0	0	0	0	0	0
Z [Ω]	12,581	78,544	12,581	78,544	16,905	77,788

Zkratový výkon v místě zkratu vypočteme dle vzorce:

$$S_k = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_k'' \quad [MVA; kV, kA] \quad (4.1.3-1)$$

Kde je,

- S_k zkratový výkon v místě zkratu,
 U_N jmenovité napětí uzlu (přípojnice),
 I_k'' počáteční rázový zkratový proud,

Zkratový výkon pro trojfázový souměrný zkrat v místě zkratu „a“ bude:

$$S_{ka} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 5,553 = 1\,058\,MVA$$

Pro výpočet dvoufázového zkratu nejdříve zajdeme do „Nastavení“ viz předchozí postup a nastavíme, aby došlo ke zkratu mezi fází „A“ a „B“. Potvrdíme výběr a spustíme výpočet s označeným uzlem U2, který odpovídá místu zkratu „a“. Výsledky zde vyexportujeme. V tomto případě počáteční rázový zkratový proud je $I_{k2}'' = 4\,809\,kA$. Napětí na postižených fázích v místě zkratu se sníží na hodnotu omezenou zkratovou impedancí sousledné složky a na nepostižené fázi naměříme dvojnásobek této hodnoty. Jedná se o nesouměrný zkrat, kromě sousledné složky má i zpětnou složku zkratového proudu.

Obr. 4.1.3-5 DNCalc-Nastavení dvoufázového zkratu

Tab. 4.1.3-3 Hodnoty napětí a proudu v místě dvoufázového zkratu „a“

Poměry v uzlu U2								
	A	α [°]	B	α [°]	C	α [°]	N	α [°]
I_k [kA]	4,809	-48,544	4,809	131,456	0	0	0	0
U_k [kV]	34,93	-60	34,93	-60	69,859	120	0	0

Tab. 4.1.3-4 Rozklad na souměrné složky

Složkové schéma uzlu U2						
	sousledná	α [°]	zpětná	α [°]	netočivá	α [°]
I_{ksym} [kA]	2,776	-78,544	2,776	-18,544	0	0
U_{ksym} [kV]	34,93	0	34,93	-120	0	0
Z [Ω]	12,581	78,544	12,581	78,544	16,905	77,788

Zkratový výkon pro dvoufázový zkrat v místě zkratu „a“ bude:

$$S_{ka} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I''_{k2} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 4,809 = 916 \text{ MVA}$$

Výpočet zkratových poměrů pro místo zkratu „c“, jenž představuje uzel U7 na napěťové hladině 22 kV, provedeme stejným způsobem. Zde zobrazíme již jen výsledky.

Tab. 4.1.3-5 Hodnoty napětí a proudu v místě trojfázového zkratu "c"

Poměry v uzlu U7								
	A	α [°]	B	α [°]	C	α [°]	N	α [°]
I_k [kA]	6,449	-71,882	6,449	168,118	6,449	48,118	0	0
U_k [kV]	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.1.3-6 Rozklad na souměrné složky

Složkové schéma uzlu U7						
	sousledná	α [°]	zpětná	α [°]	netočivá	α [°]
I_{ksym} [kA]	6,449	-71,882	0	0	0	0
U_{ksym} [kV]	0	0	0	0	0	0
Z [Ω]	2,167	71,882	2,167	71,882	4,32	59,364

Zkratový výkon pro trojfázový souměrný zkrat v místě zkratu „c“ bude:

$$S_{kc} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I''_{k3} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 6,449 = 246 \text{ MVA}$$

Tab. 4.1.3-7 Hodnoty napětí a proudu v místě dvoufázového zkratu "c"

Poměry v uzlu U7								
	A	α [°]	B	α [°]	C	α [°]	N	α [°]
I_k [kA]	5,585	-41,882	5,585	138,118	0	0	0	0
U_k [kV]	6,986	-60	6,986	-60	13,972	120	0	0

Tab. 4.1.3-8 Rozklad na souměrné složky

Složkové schéma uzlu U7						
	sousledná	α [°]	zpětná	α [°]	netočivá	α [°]
I_{ksym} [kA]	3,224	-71,882	3,224	-11,882	0	0
U_{ksym} [kV]	6,986	0	6,986	-120	0	0
Z [Ω]	2,167	71,882	2,167	71,882	4,32	59,364

Zkratový výkon pro dvoufázový zkrat v místě zkratu „c“ bude:

$$S_{kc} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I''_{k2} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 5,585 = 213 \text{ MVA}$$

- 2) V dalším úkolu proveďte návrh reaktoru v odbočce k distribučnímu transformátoru tak aby v místě souměrného trojfázového zkratu poklesl zkratový výkon o 30 %.

Nejdříve provedeme výpočet zkratových poměrů v zadaném místě dle zadání. Tomu odpovídá uzel U11. Postup výpočtu bude totožný s předchozím výpočtem.

Tab. 4.1.3-9 Hodnoty napětí a proudu v místě trojfázového zkratu "2"

Poměry v uzlu U11								
	A	α [°]	B	α [°]	C	α [°]	N	α [°]
I_k [kA]	3,666	-63,66	3,666	176,34	3,666	56,34	0	0
U_k [kV]	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.1.3-10 Rozklad na souměrné složky

Složkové schéma uzlu U11						
	sousledná	α [°]	zpětná	α [°]	netočivá	α [°]
I_{ksym} [kA]	3,666	-63,66	0	0	0	0
U_{ksym} [kV]	0	0	0	0	0	0
Z [Ω]	3,811	63,66	3,811	63,66	8,942	57,81

Zkratový výkon pro trojfázový souměrný zkrat v místě zkratu „2“ bude:

$$S_{k2} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I''_{k3} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 3,666 = 140 \text{ MVA}$$

Z toho snížený výkon o 30 % bude:

$$S_{k2PR} = 0,7 \cdot S_{k2} = 0,7 \cdot 140 = 98 \text{ MVA}$$

Vypočteme potřebnou velikost impedance:

$$Z_{(1)PR} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k2PR}} \quad [\Omega; kV, MVA] \quad (4.1.3-2)$$

Kde je,

$Z_{(1)PR}$ Potřebná impedance

U_n Jmenovité napětí uzlu (přípojnice)

S_{k2PR} Snížený zkratový výkon o 30 %

$$Z_{(1)PR} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k2PR}} = \frac{1,1 \cdot 22^2}{98} = 5,434 \Omega$$

Souslednou složku impedance do místa zkratu vyčteme z tab. 4.1.3-10:

$$Z_{(1)} = 3,811 \, \Omega$$

Reaktor musí dodat impedanci o hodnotě:

$$Z_{(1)R} = Z_{(1)PR} - Z_{(1)} = 5,434 - 3,811 = 1,623 \, \Omega$$

Pomocí vzorce vypočteme impedanční napětí reaktoru:

$$Z_{(1)R} = \frac{10 \cdot u_r \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad [\Omega; \%, kV, A] \quad (4.1.3-3)$$

Kde je,

$Z_{(1)R}$ Impedance reaktoru

u_r Impedanční napětí reaktoru

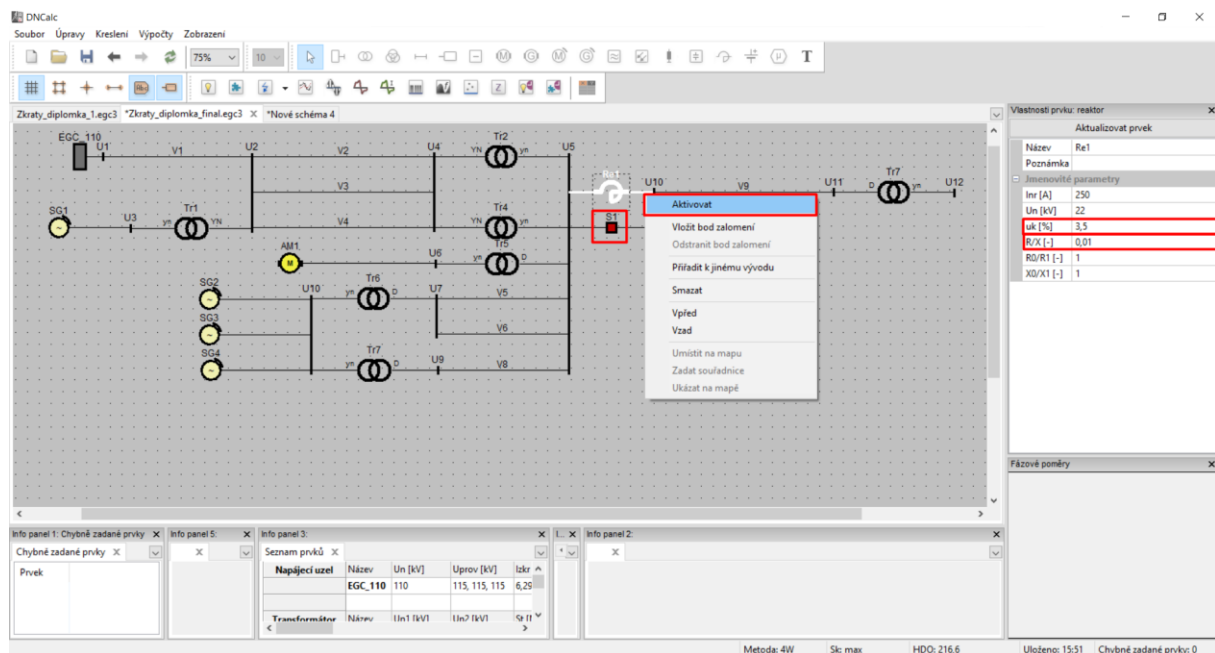
U_n Jmenovité napětí reaktoru

I_n Jmenovitý proud reaktoru

Po úpravě a dosazení:

$$u_r = \frac{Z_{(1)R} \cdot \sqrt{3} \cdot I_n}{10 \cdot U_n} = \frac{1,623 \cdot \sqrt{3} \cdot 250}{10 \cdot 22} = 3,2 \% \sim 3,5 \%$$

Tuto hodnotu dosadíme do reaktoru, zároveň upravíme ztrátový činitel reaktoru $\frac{R}{X} [-]$ na hodnotu 0,01 jelikož uvažujeme převážně indukční charakter ($R = 0,01X$). Dvakrát levým tlačítkem myši klepneme na vypínač, ten změní barvu ze zelené na červený, což značí rozpojený stav. Nakonec klikneme pravým tlačítkem myši na reaktor a zvolíme „Aktivovat“, ten změní barvu z bílé na černou. V uzlu U11 spustíme nový výpočet zkratových poměrů a provedeme kontrolu výsledků.



Obr. 4.1.3-6 DNCalc-Parametry reaktoru, výpočet zkratových poměrů

Tab. 4.1.3-11 Hodnoty napětí a proudu v místě trojfázového zkratu "2" se zapojeným reaktorem

Poměry v uzlu U11								
	A	α [°]	B	α [°]	C	α [°]	N	α [°]
I_k [kA]	2,555	-71,789	2,555	168,211	2,555	48,211	0	0
U_k [kV]	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.1.3-12 Rozklad na souměrné složky

Složkové schéma uzlu U11						
	sousledná	α [°]	zpětná	α [°]	netočivá	α [°]
I_{ksym} [kA]	2,555	-71,789	0	0	0	0
U_{ksym} [kV]	0	0	0	0	0	0
Z [Ω]	5,468	71,789	5,468	71,789	10,498	62,905

Zkratový výkon při použití reaktoru pak bude:

$$S_{k2R} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I''_{k3} = \sqrt{3} \cdot 22 \cdot 2,555 = 97 \text{ MVA}$$

Závěr

V této práci jsem se zabýval převážně implementací výukových úloh výpočtu ustálených sítí a zkratových poměrů do programu DNCalc, což je program určený k modelování a výpočtu komplexních distribučních sítí. Obsahuje řadu výpočtových modulů od chodu sítě v ustáleném stavu přes útlum hdo až po časový rozvoj chodu sítě či spolehlivostní výpočty. V této práci jsem však využil jen určité moduly, a to zejména ustálený chod sítě, připojitelnost a ztráty v síti v úloze „Návrh distribuční sítě“. V druhé úloze jsem využil modulu zkratové poměry.

V první úloze „Návrh distribuční sítě“ jsem nejprve popsal krok za krokem namodelování celé sítě v prostředí programu. Dále jsem provedl krok za krokem výpočet jednotlivých bodů programu. V prvním bodě měl student za úkol vypočítat napěťové a proudové poměry v síti bez vlivu synchronního generátoru. V druhém úkolu zjišťoval limitní výkon s ohledem na podmínky připojitelnosti. V dalším úkolu zjišťoval, jak se chová síť při různých provozních stavech. Ve čtvrtém bodě měl za úkol měnit jalový výkon na synchronním generátoru a sledovat napěťové poměry v síti. V pátém úkolu sledoval stejnou závislost jen místo jalového výkonu měnil činný výkon, který synchronní generátor dodává do sítě. V dalším úkolu odpojil jen z napájecích vedení a zobrazil, jak se změní zatížení a úbytky napětí. V sedmém a osmém bodě zpracovával ekonomické zhodnocení navržené sítě

V druhé úloze „Zkraty v síti“ jsem také nejdříve ukázal možnosti vkládání prvků a přiřazení údajů k nim. Prvním bodem úkolu bylo vypočítat počáteční rázový zkratový proud třífázového souměrného zkratu a dvoufázového zkratu, všechny výpočty zde zastupuje program a výstupem je tabulka s hodnotami počátečních rázových zkratových proudů a napětí v místě zkratu. Taktéž je výstupem tabulka ve složkovém tvaru, která navíc obsahuje i jednotlivé složky impedance do místa zkratu. V druhém bodu úkolu měl student navrhnout reaktor který sníží zkratový výkon v zadaném místě o 30 %. Hlavní parametr, který zde zjišťoval bylo impedanční napětí reaktoru.

Příloze jsou přiloženy variantní zadání pro studenty se základní konfigurací sítě v programu DNCalc, která slouží jako při modelování. Podrobné výsledky všech ostatních variant semestrálních úloh byly v den odevzdání práce předány vedoucímu práce na paměťovém nosiči.

Závěrem bych také chtěl dodat, že hlavním cílem této práce je přiblížit studentům možnosti softwarových nástrojů a přispět tak do již rozjetého vlaku moderní digitalizace. Nespornou výhodou softwarových řešení je rychlost a možnost tak řešit komplexní a rozsáhlé úlohy, na které by jinak nebyl čas.

Použitá literatura

- [1] Česká přenosová a distribuční soustava - 1. díl: Elektrifikace a princip funkce [online]. 2019 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-1-dil-elektrifikace-a-princip-funkce>
- [2] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. [Praha]: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [3] HALUZÍK, Evžen. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
- [4] VYHLÁŠKA č. 16/2016 Sb.: *Vyhláška o podmínkách připojení k elektrizační soustavě*. In: . Praha: Ministerstvo obchodu a průmyslu, 2016, 7/2016.
- [5] ČEZ Distribuce, a.s. *Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy*
- [6] *Studie připojitelnosti výrobní* [online]. [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <http://www.orgrez.cz/sluzby/studie-pripojitelnosti-vyrobní/?oreawe67tdyfc=yes>
- [7] MEDVEC, Zdeněk. *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách: návody do cvičení*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-707-8856-9.
- [8] ČSN EN 60909-0. *Zkratové proudy v trojfázových soustavách: Část 0 – Výpočet proudů*. Praha: Český normalizační institut, 2002. 64 s
- [9] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [10] VOKÁ L, Josef. *Výpočty zkratů v technické praxi*. Energetika. 2013, Ročník 63, č. 1, s. 539-559

Seznam příloh

- I. Ekonomické_hodnocení_2021.xls

Výpočet NPV

období	zatižení	odebraná energie	odbytová cena energie	tržby	nákupní cena energie	náklady na opatř. energie	provoz, opravy a údržba	ztráty elektr. energie	náklady na ztráty	odpisy					provozní náklady celkem	základ daně	daň z příjmu	hospod. výsl. po zdanění	provozní cash flow	invest. náklady	cash flow	diskontní faktor	aktual. cash flow	kumul. cash flow
										1. odpis.	3. odpis.	4. odpis.	5. odpis.	celkem										
[rok]	[MW]	[MWh]	[Kč/MWh]	[mil. Kč]	[Kč/MWh]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[MWh]	[mil. Kč]	skupina [mil. Kč]	skupina [mil. Kč]	skupina [mil. Kč]	skupina [mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[-]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	
2021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76	-	0,909	-69,023	-69,023	
2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76	-	0,826	-62,748	-131,771	
2023	5,844	29220	2047	59,813	1547	32,827	1,215	274	0,423	2,000	2,961	4,990	0,283	10,234	44,700	15,114	2,872	12,242	22,476	0	22,476	0,751	16,887	-114,884
2024	5,873	29366	2129	62,517	1593	34,045	1,318	275	0,438	3,000	5,432	9,481	0,547	18,460	54,262	8,255	1,569	6,687	25,147	0	25,147	0,683	17,176	-97,708
2025	5,903	29513	2214	65,343	1641	35,307	1,430	276	0,454	2,000	4,938	8,982	0,529	16,449	53,640	11,703	2,224	9,480	25,928	0	25,928	0,621	16,099	-81,609
2026	5,932	29660	2303	68,296	1690	36,616	1,552	278	0,470	1,000	4,444	8,483	0,510	14,437	53,074	15,222	2,892	12,330	26,767	0	26,767	0,564	15,109	-66,499
2027	5,962	29809	2395	71,383	1741	37,973	1,684	279	0,486	0,000	3,950	7,984	0,491	12,425	52,567	18,816	3,575	15,241	27,666	0	27,666	0,513	14,197	-52,302
2028	5,992	29958	2490	74,610	1793	39,379	1,827	281	0,503	0,000	3,455	7,485	0,473	11,413	53,122	21,488	4,083	17,405	28,818	0	28,818	0,467	13,444	-38,859
2029	6,022	30108	2590	77,982	1847	40,837	1,982	282	0,521	0,000	2,961	6,986	0,453	10,400	53,740	24,242	4,606	19,636	30,036	0	30,036	0,424	12,738	-26,120
2030	6,052	30258	2694	81,507	1903	42,349	2,150	283	0,539	0,000	2,467	6,487	0,434	9,389	54,427	27,080	5,145	21,935	31,323	0	31,323	0,386	12,077	-14,044
2031	6,082	30409	2801	85,191	1960	43,916	2,333	285	0,558	0,000	1,977	5,988	0,416	8,380	55,187	30,004	5,701	24,303	32,683	0	32,683	0,350	11,455	-2,588
2032	6,112	30562	2914	89,042	2018	45,540	2,531	286	0,578	0,000	1,482	5,489	0,397	7,368	56,018	33,024	6,275	26,749	34,118	0	34,118	0,319	10,871	8,283
2033	6,143	30714	3030	93,066	2079	47,224	2,747	288	0,598	0,000	0,988	4,990	0,377	6,356	56,924	36,142	6,867	29,275	35,631	0	35,631	0,290	10,321	18,603
2034	6,174	30868	3151	97,273	2141	48,970	2,980	289	0,619	0,000	0,494	4,491	0,359	5,344	57,912	39,360	7,478	31,882	37,226	0	37,226	0,263	9,803	28,406
2035	6,204	31022	3277	101,670	2206	50,779	3,233	290	0,641	0,000	0,000	3,992	0,340	4,332	58,985	42,684	8,110	34,574	38,906	0	38,906	0,239	9,314	37,720
2036	6,235	31177	3408	106,265	2272	52,655	3,508	292	0,663	0,000	0,000	3,493	0,321	3,814	60,641	45,624	8,669	36,956	40,770	0	40,770	0,218	8,873	46,593
2037	6,267	31333	3545	111,068	2340	54,599	3,806	293	0,687	0,000	0,000	2,994	0,303	3,297	62,389	48,679	9,249	39,430	42,727	0	42,727	0,198	8,453	55,046
2038	6,298	31490	3687	116,088	2410	56,615	4,130	295	0,711	0,000	0,000	2,495	0,283	2,778	64,234	51,855	9,852	42,003	44,781	0	44,781	0,180	8,054	63,100
2039	6,329	31647	3834	121,336	2482	58,704	4,481	296	0,736	0,000	0,000	1,996	0,264	2,260	66,181	55,155	10,479	44,675	46,936	0	46,936	0,164	7,674	70,775
2040	6,361	31806	3987	126,820	2557	60,870	4,862	298	0,762	0,000	0,000	1,497	0,246	1,743	68,236	58,584	11,131	47,453	49,196	0	49,196	0,149	7,313	78,087
2041	6,393	31965	4147	132,552	2634	63,115	5,275	299	0,788	0,000	0,000	0,998	0,227	1,225	70,403	62,149	11,808	50,341	51,566	0	51,566	0,135	6,968	85,055
2042	6,425	32124	4313	138,544	2713	65,442	5,724	301	0,816	0,000	0,000	0,499	0,207	0,706	72,688	65,856	12,513	53,343	54,050	0	54,050	0,123	6,640	91,695

Zadání programu

- a) V programu DNCalc vypočtete ustálený chod sítě s odpojeným zdrojem a záložním vedením. V tabulce zobrazte úbytky napětí ve všech uzlech sítě a procentní zatížení všech prvků sítě (tj, úseky vedení, transformátor,...)
 - b) Provedte výpočet připojitelnosti s připojeným zdrojem a určete limitní činný výkon zdroje. A to tak, aby v celé síti nedošlo ke změně napětí o více než 2 %.
 - c) Zkonstruuje grafickou závislost $U=f(l)$. Graf doplňte úsečkou, která znázorňuje dovolený úbytek napětí (5 % z U na začátku vedení). A to pro:
 - Síť s odpojeným zdrojem a záložním vedením
 - Síť s odpojeným zdrojem a připojeným záložním vedením
 - Síť s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením
 - Síť s připojeným zdrojem a záložním vedením
- Dále po připojení zdroje s odpojeným záložním vedením zkonstruuje grafickou závislost $\Delta U_{\%} = f(l)$ s doplněním přímky znázorňující podmínky připojení do distribuční sítě (2 % z U)
- d) Provedte výpočet ustáleného chodu sítě s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením pro různá Q zdroje. Měňte Q zdroje a vynesete grafickou závislost $U = f(l)$. Provedte výpočet pro celkem 7 různých hodnot Q (3x kapacitní, nulovou a 3x induktivní). Dále do sloupcového grafu vynesete závislost celkových činných ztrát sítě $\Delta P = f(Q_z)$
 - e) Provedte výpočet ustáleného chodu sítě s připojeným zdrojem a odpojeným záložním vedením pro 10 různých hodnot činného výkonu, při stejném $\cos\varphi = 1$ (Měňte v rozsahu od 0 do limitní hodnoty, který jsme vypočetli v bodě b).) Výsledky zanechte do grafu. Do sloupcového grafu vynesete závislost celkových činných ztrát sítě na instalovaném výkonu $\Delta P = f(P_i)$.
 - f) Provedte výpočet ustáleného chodu sítě s připojeným zdrojem, s připojeným záložním vedením a odpojení nejdříve jednoho paprsku na vývodu z napájecího transformátor 22kV, a poté i po odpojení druhého paprsku. Výstupem bude tabulka s procentním zatížením jednotlivých prvků sítě (úseky vedení, transformátor) a grafická závislost $U = f(l)$ s vyznačenou přímkou znázorňující 5% dovolený úbytek napětí.
 - g) Zpracujte ekonomické hodnocení zadané sítě. Výstup bude obsahovat specifikace zařízení sítě a výpočet investičních nákladů. Také bude obsahovat tabulky ekonomického hodnocení navržené varianty sítě na základě NPV.
 - h) Stanovte důležitost těchto čtyř kritérií: $f_1(NPV)$, $f_2(\Delta P)$, $f_3(P_{zdroje})$, $f_4(\Delta U_{max\%})$ metodou Fullerova trojúhelníku. Poté sestrojte kritériální matici z variant (1A až 4A nebo 1B až 4B nebo 1C až 4C, etc.) dle zadání. Pomocí metody váženého součtu (WSA) ji převedte na normalizovanou kritériální matici a stanovte pořadí jednotlivých variant.

$f_1(NPV)$... [–] ... čistá současná hodnota

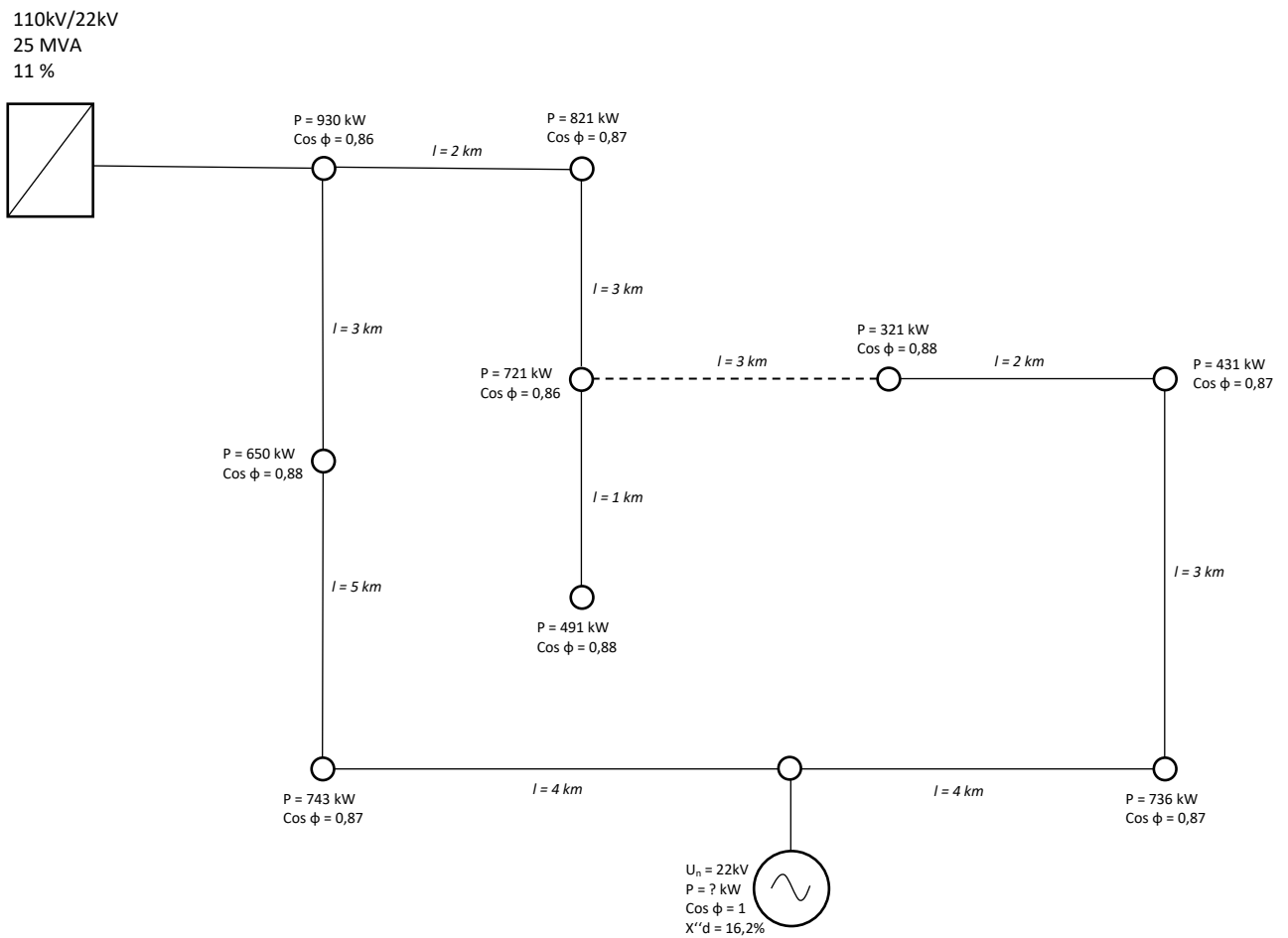
$f_2(\Delta P)$... [kW] ... činné ztráty v síti při odpojeném záložním vedení a připojeném synchronním generátorem

$f_3(P_{zdroje})$... [MW] ... limitní činný výkon synchronního generátoru

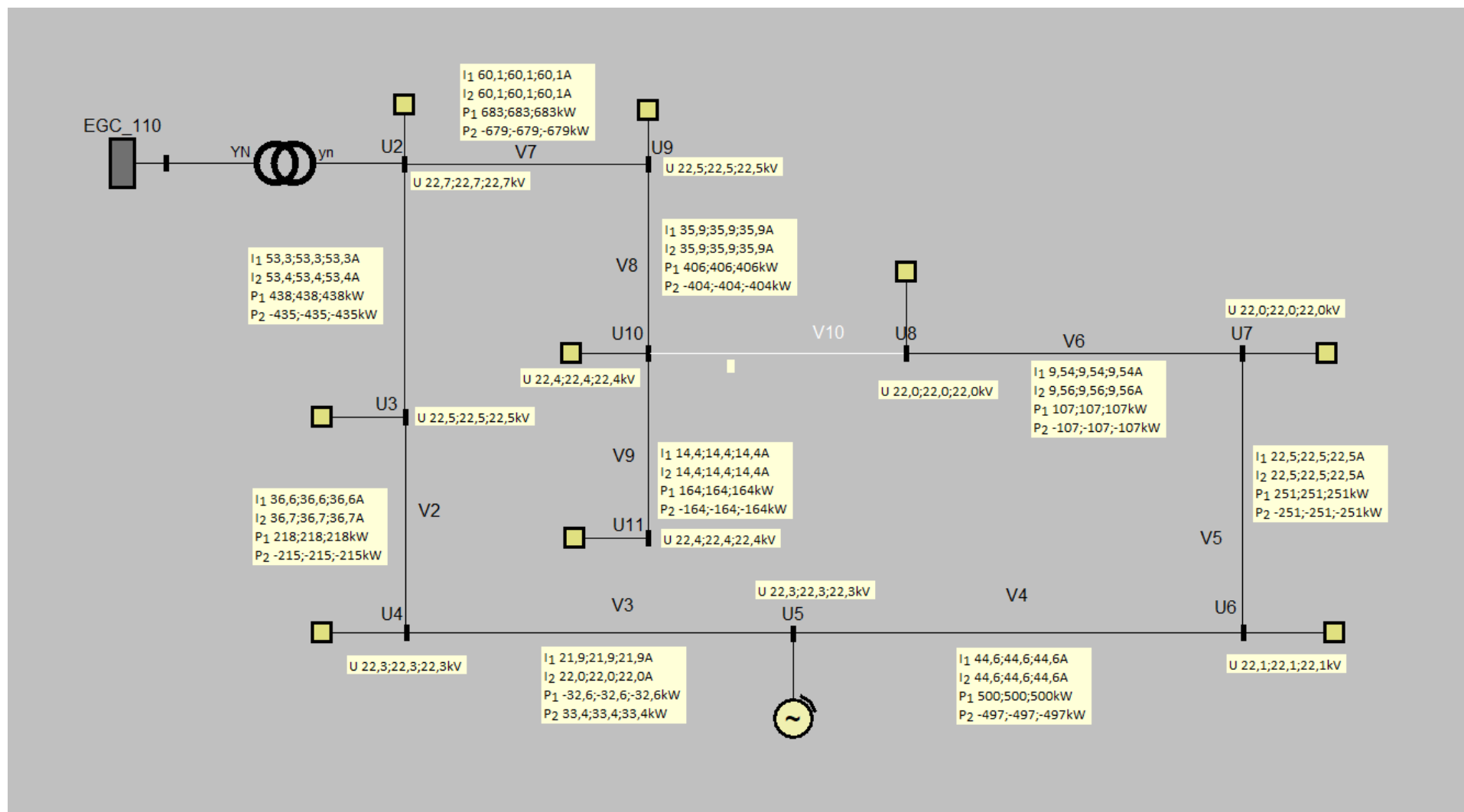
$f_4(\Delta U_{max\%})$... [%] ... maximální procentní úbytek napětí při odpojeném záložním vedení a připojeném synchronním generátoru

Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 70AlFe6



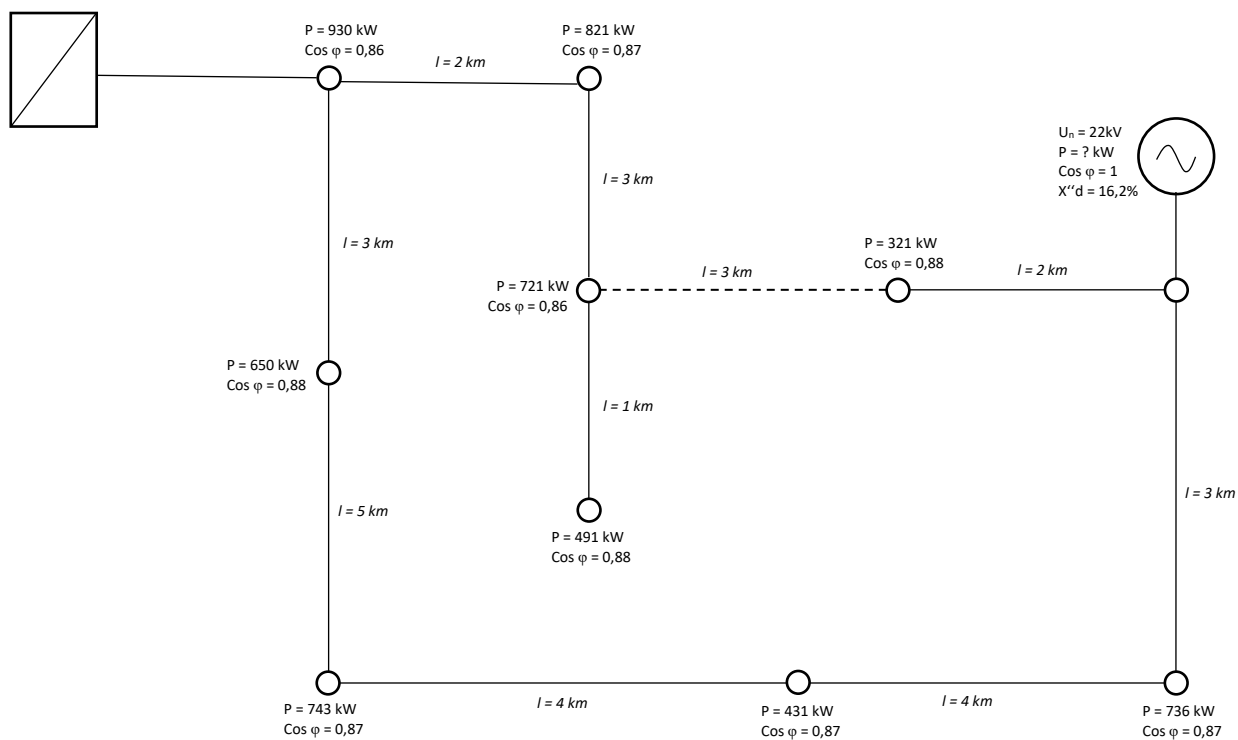
Základní konfigurace sítě pro variantu 1A. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,6 MW.



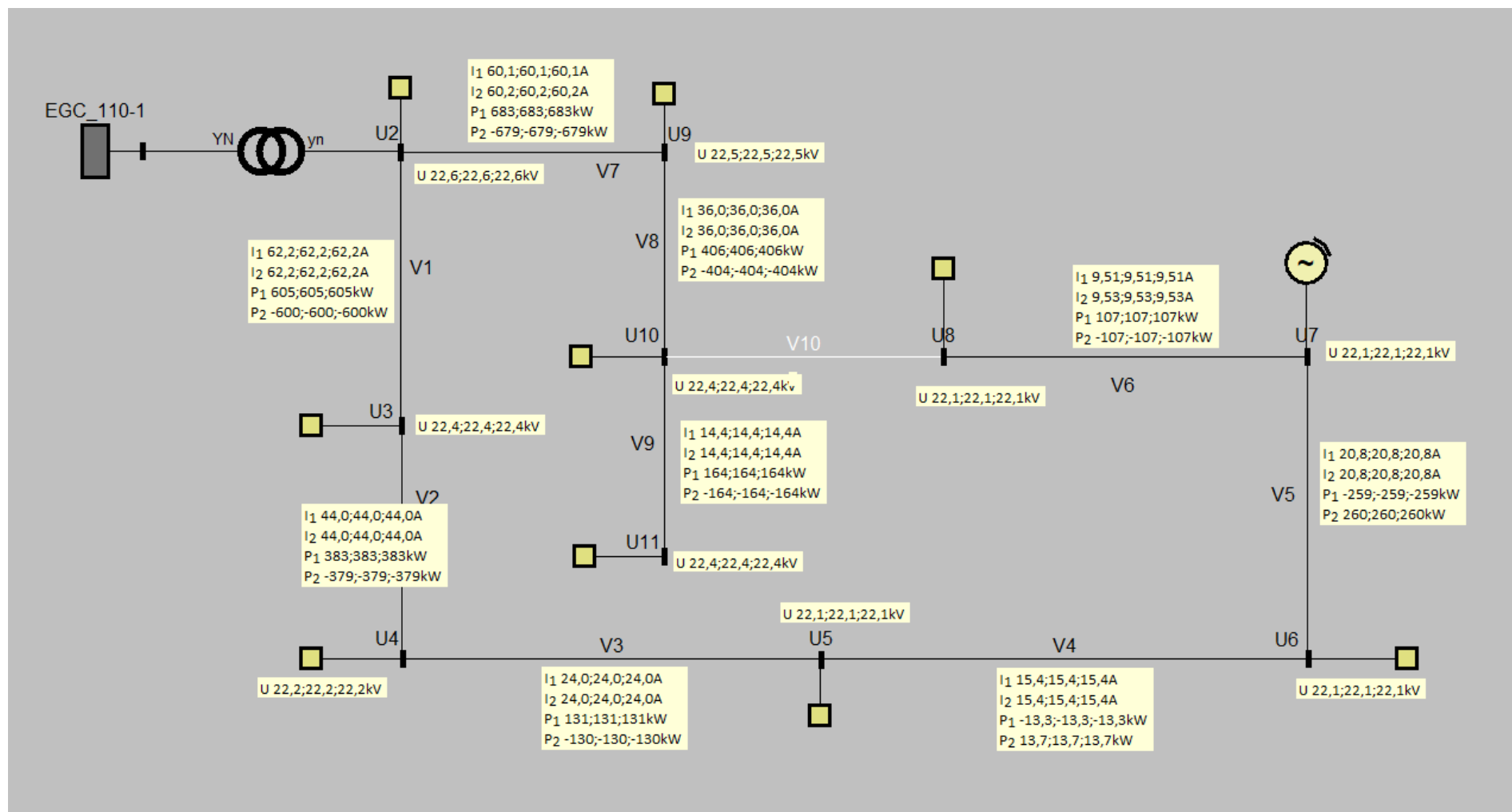
Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 70AlFe6

110kV/22kV
25 MVA
11 %

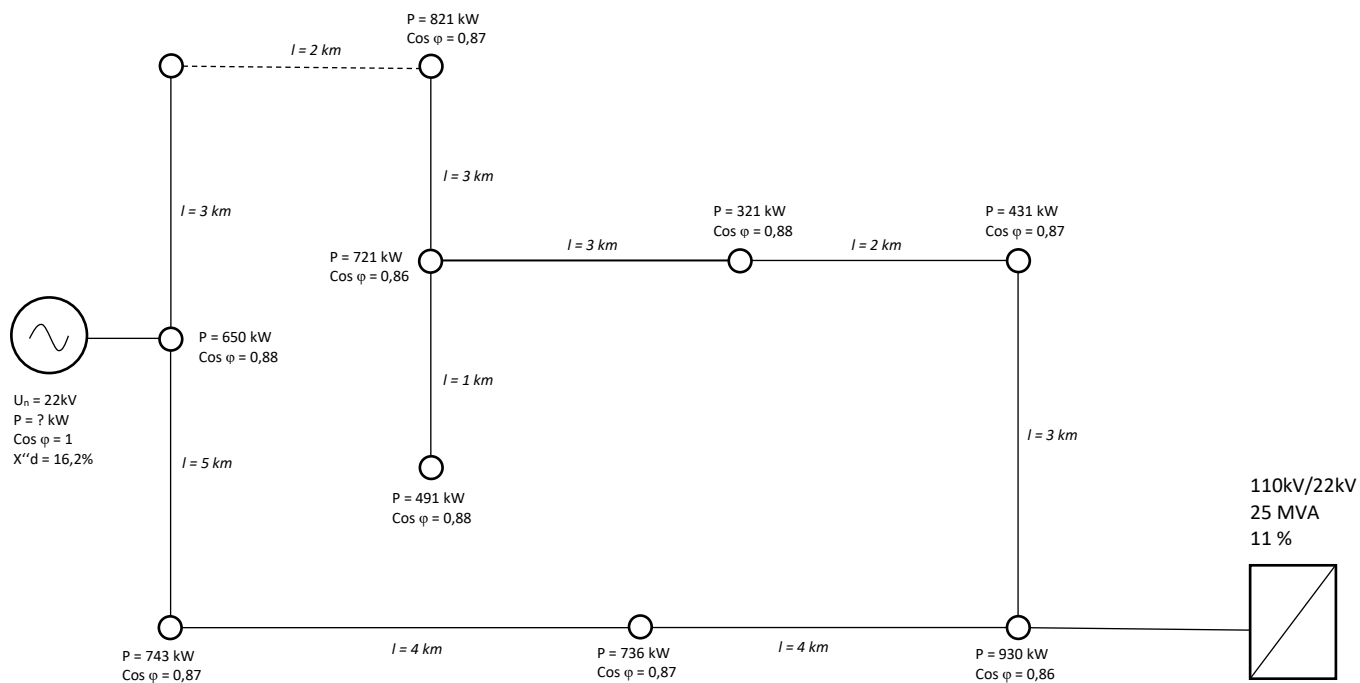


Základní konfigurace sítě pro variantu 2A. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,1 MW.

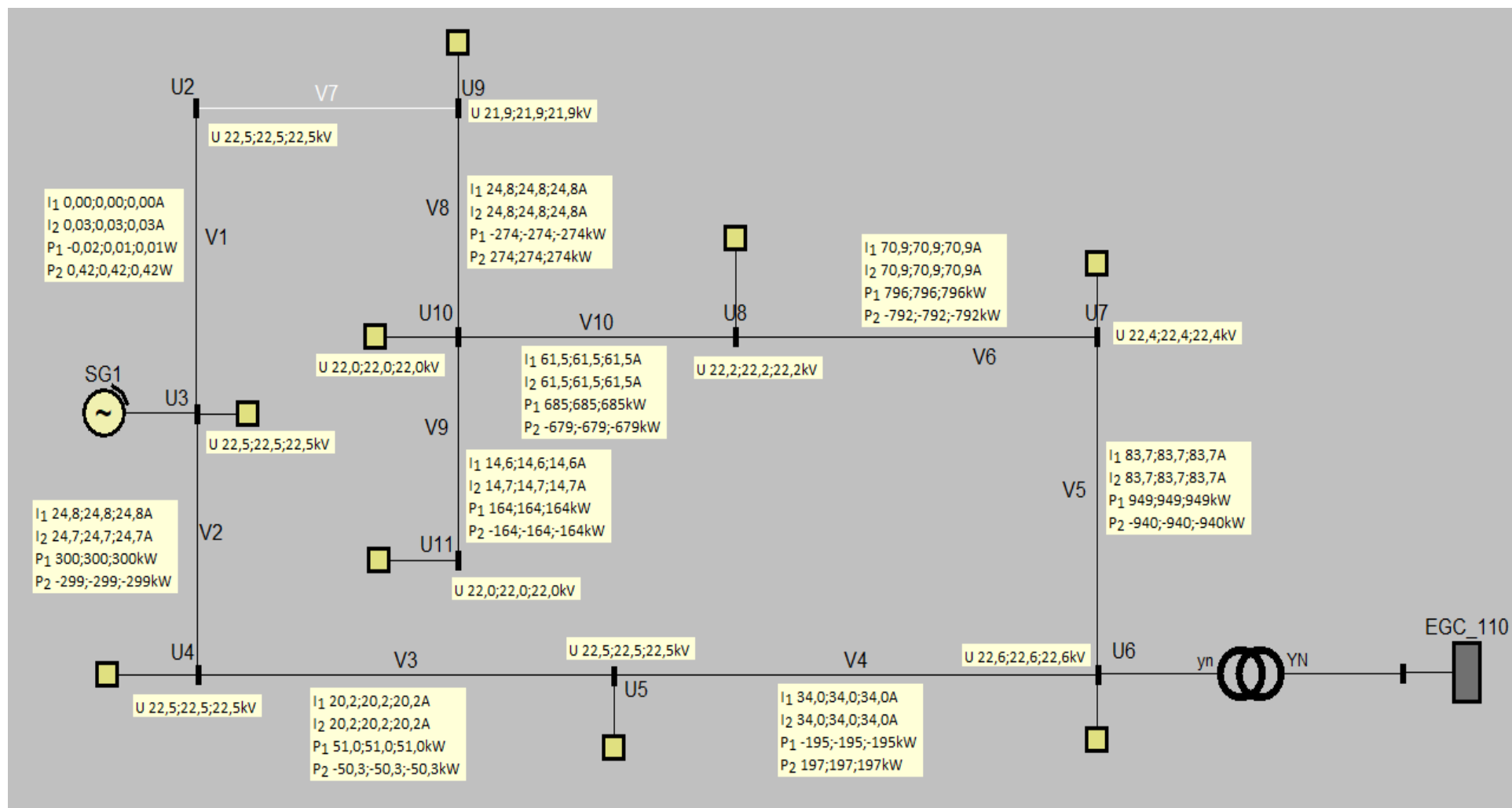


Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 70AlFe6

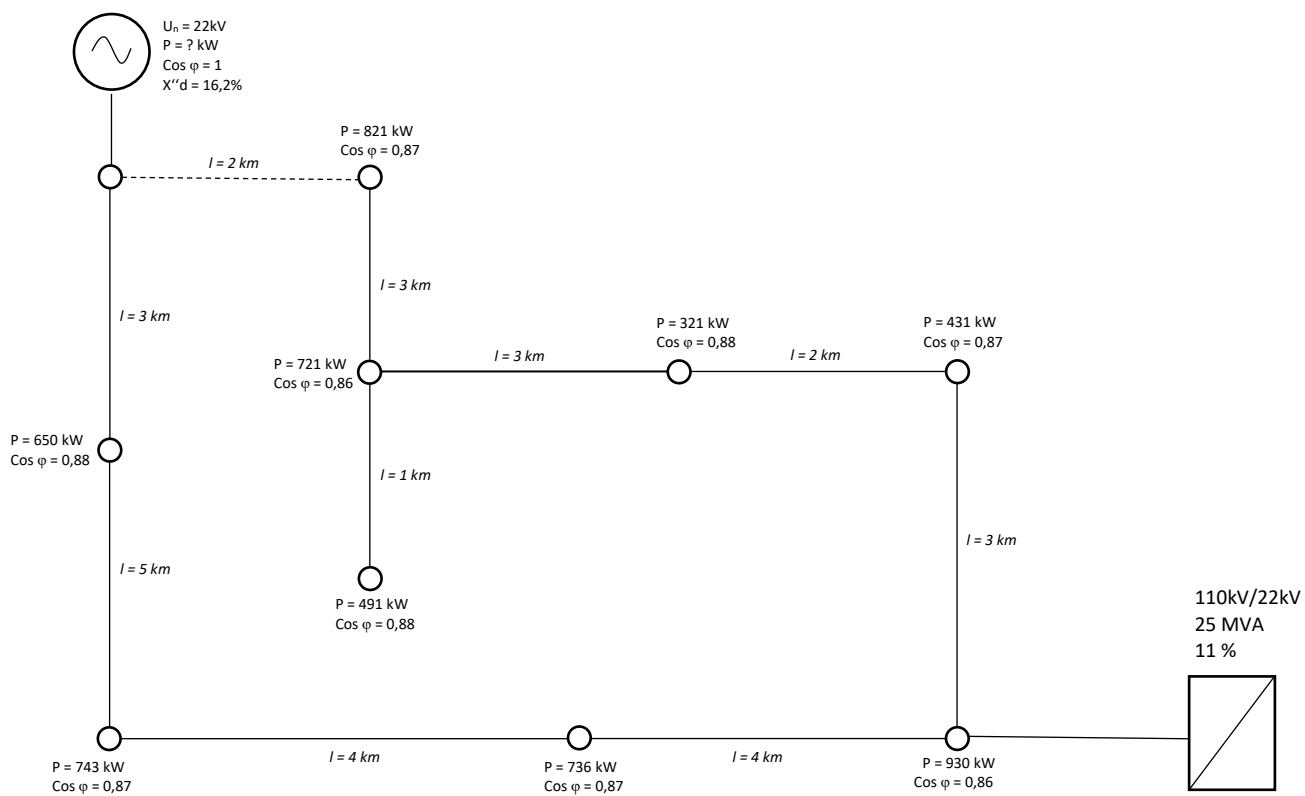


Základní konfigurace sítě pro variantu 3A. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,55 MW.

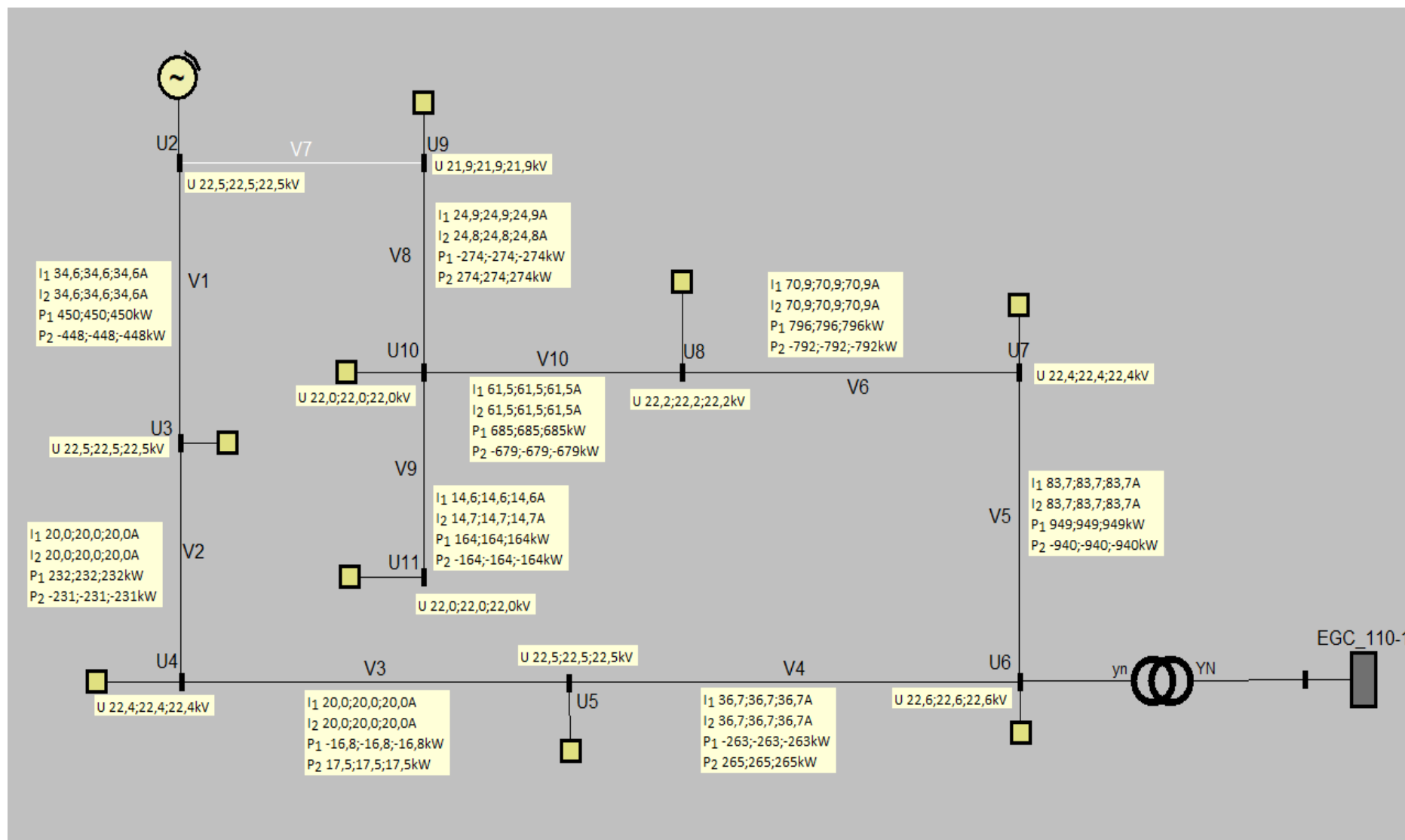


Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 70AlFe6

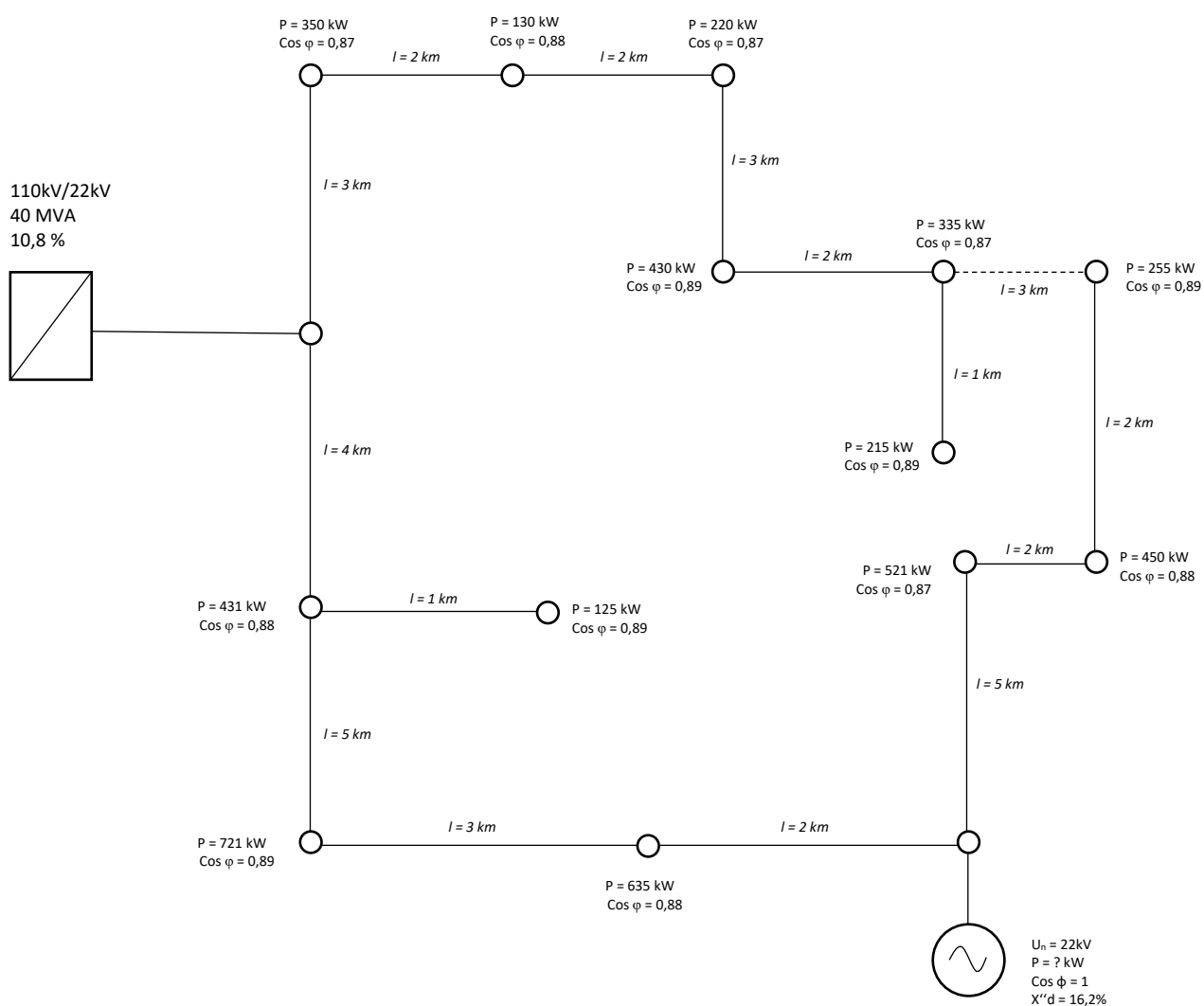


Základní konfigurace sítě pro variantu 4A. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,35 MW.

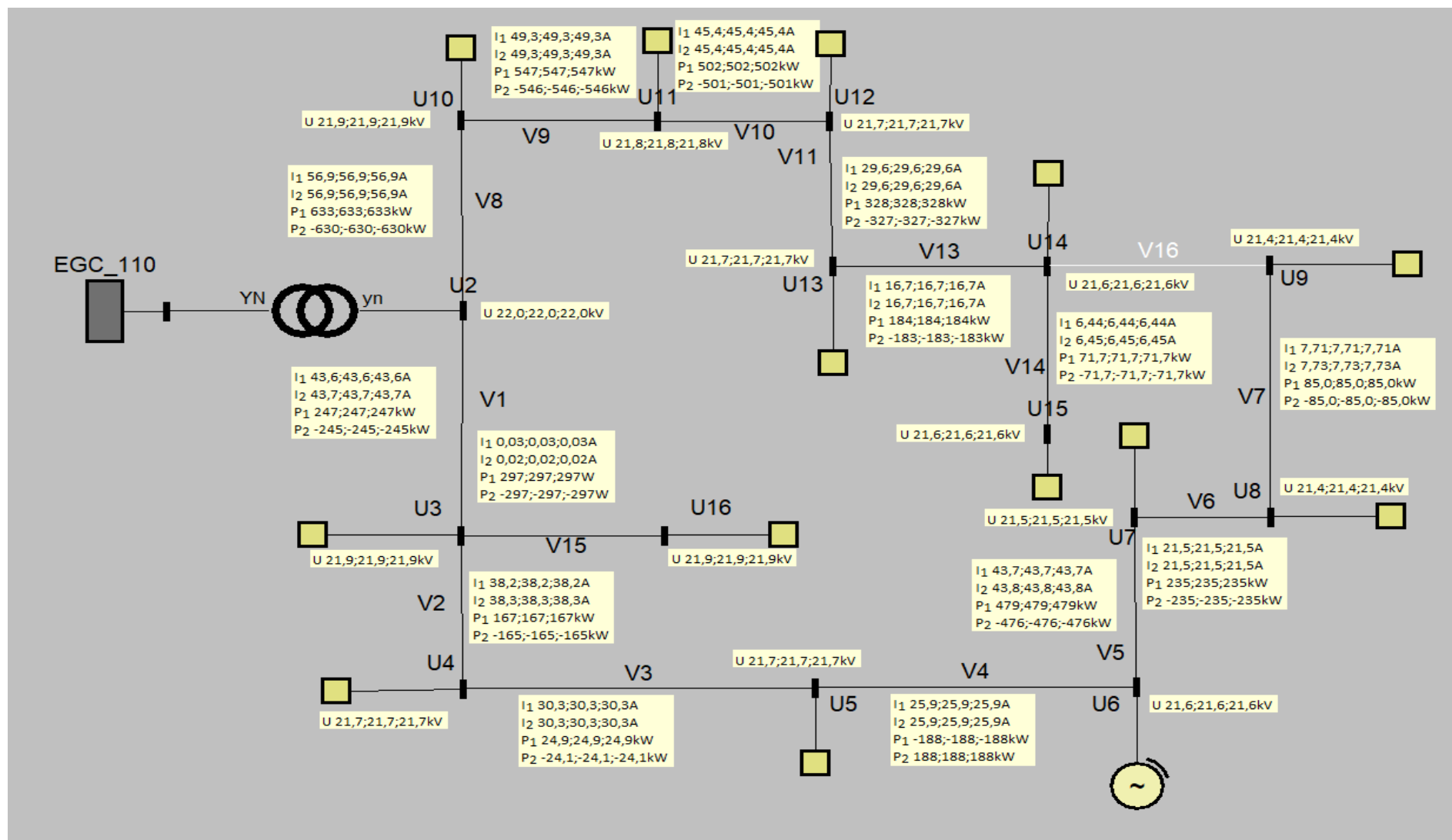


Návrh distribuční sítě

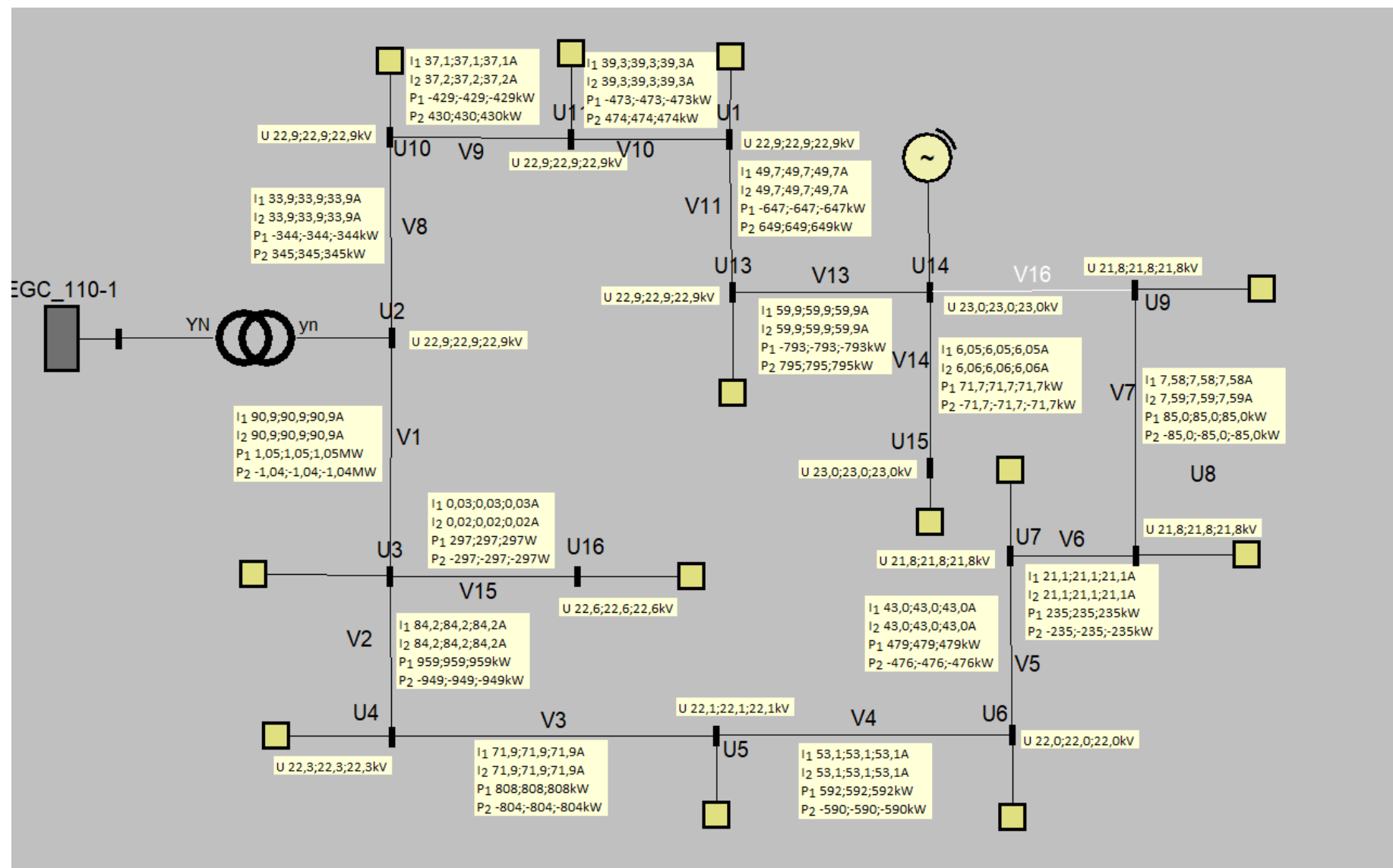
Venkovní vedení: 95AlFe6



Základní konfigurace sítě pro variantu 1B. Limitní výkon synchronního generátoru je 2 MW.

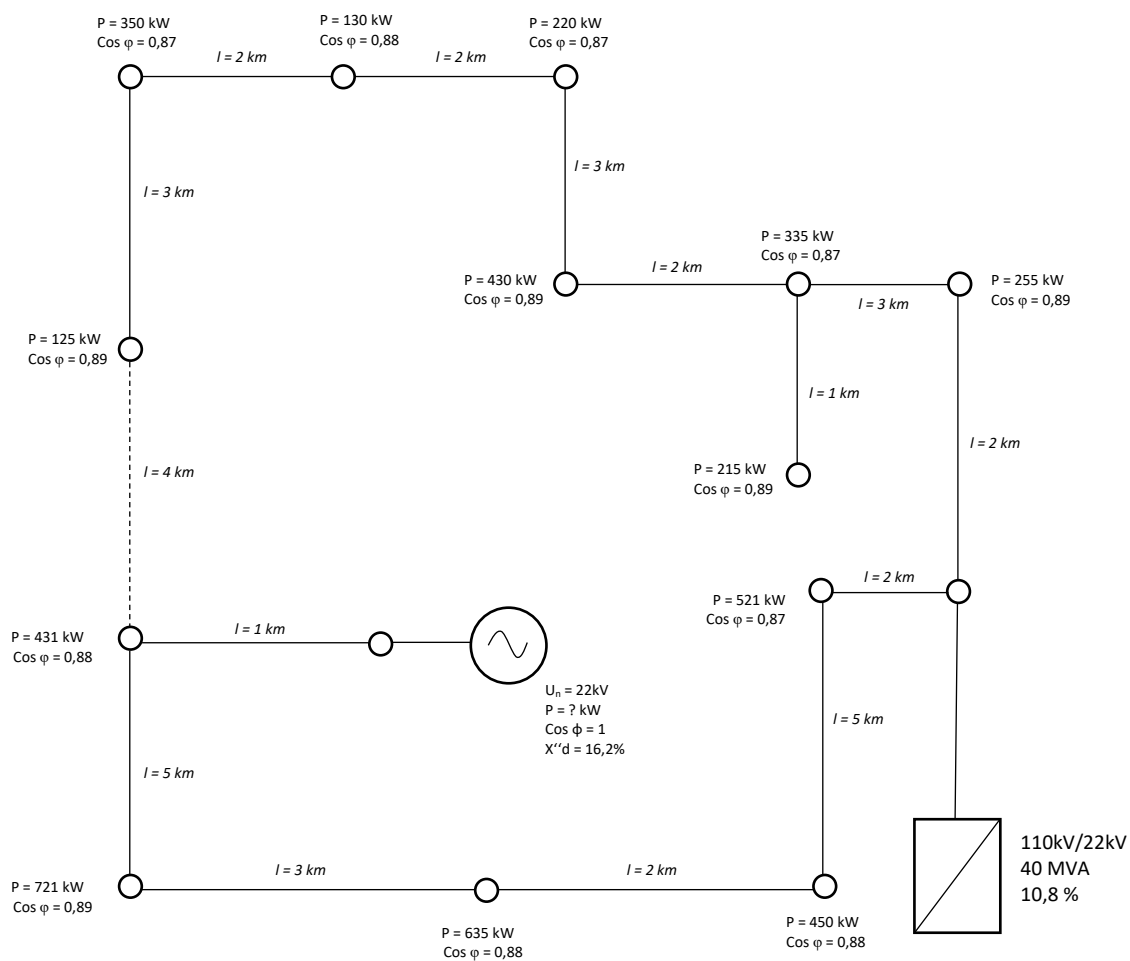


Základní konfigurace sítě pro variantu 2B. Limitní výkon synchronního generátoru je 2,6 MW.

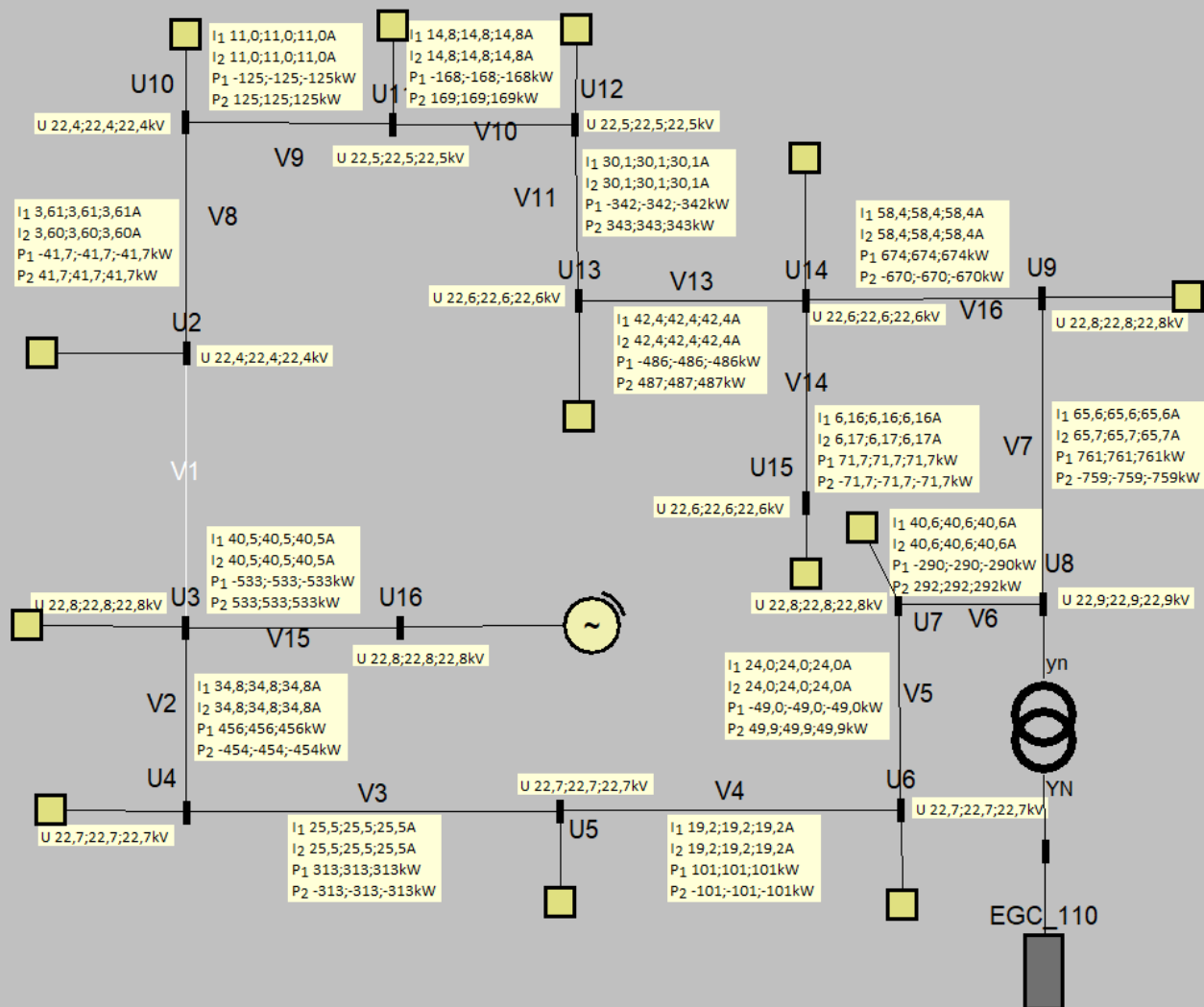


Návrh distribuční sítě

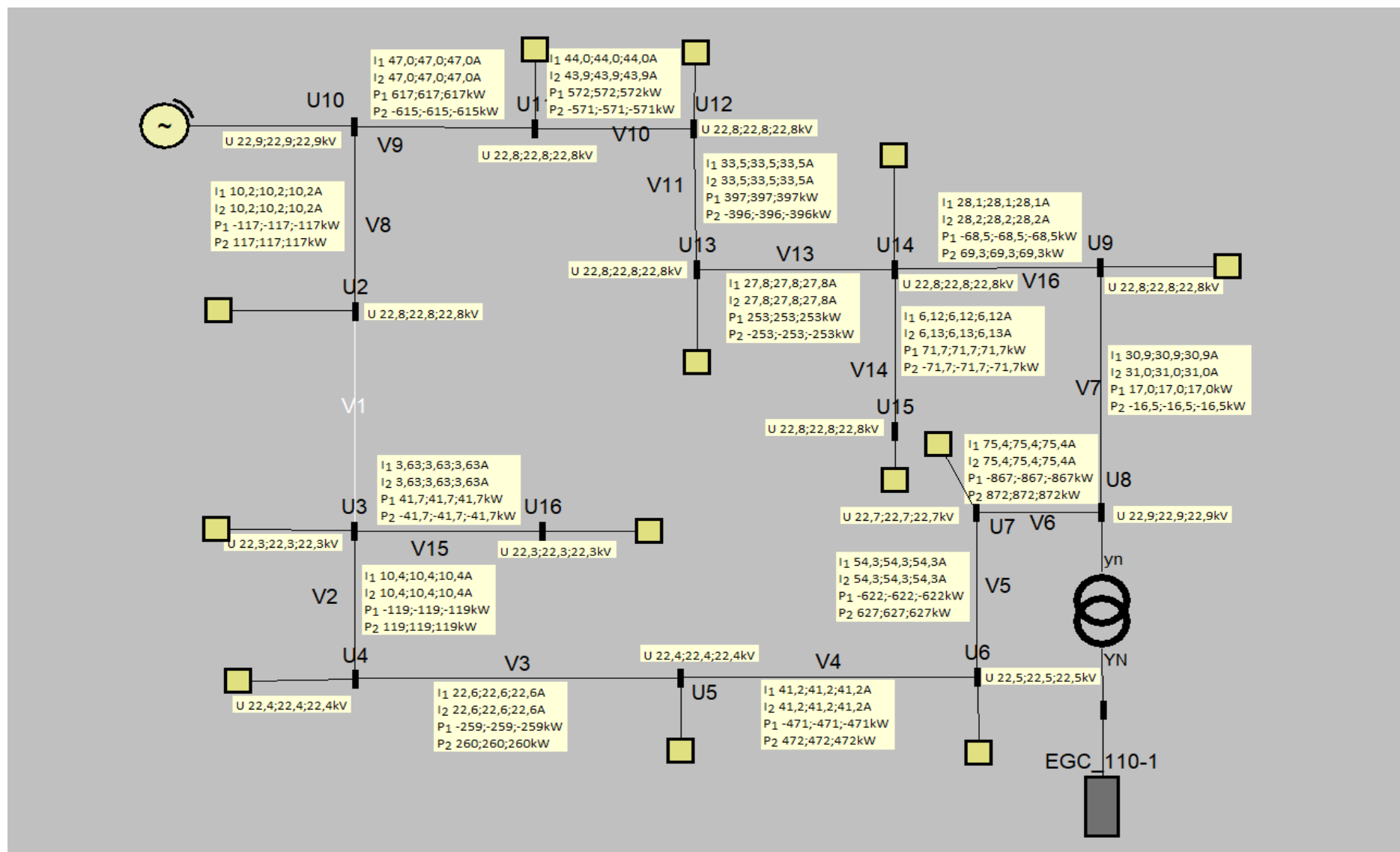
Venkovní vedení: 95AlFe6



Základní konfigurace sítě pro variantu 3B. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,6 MW.

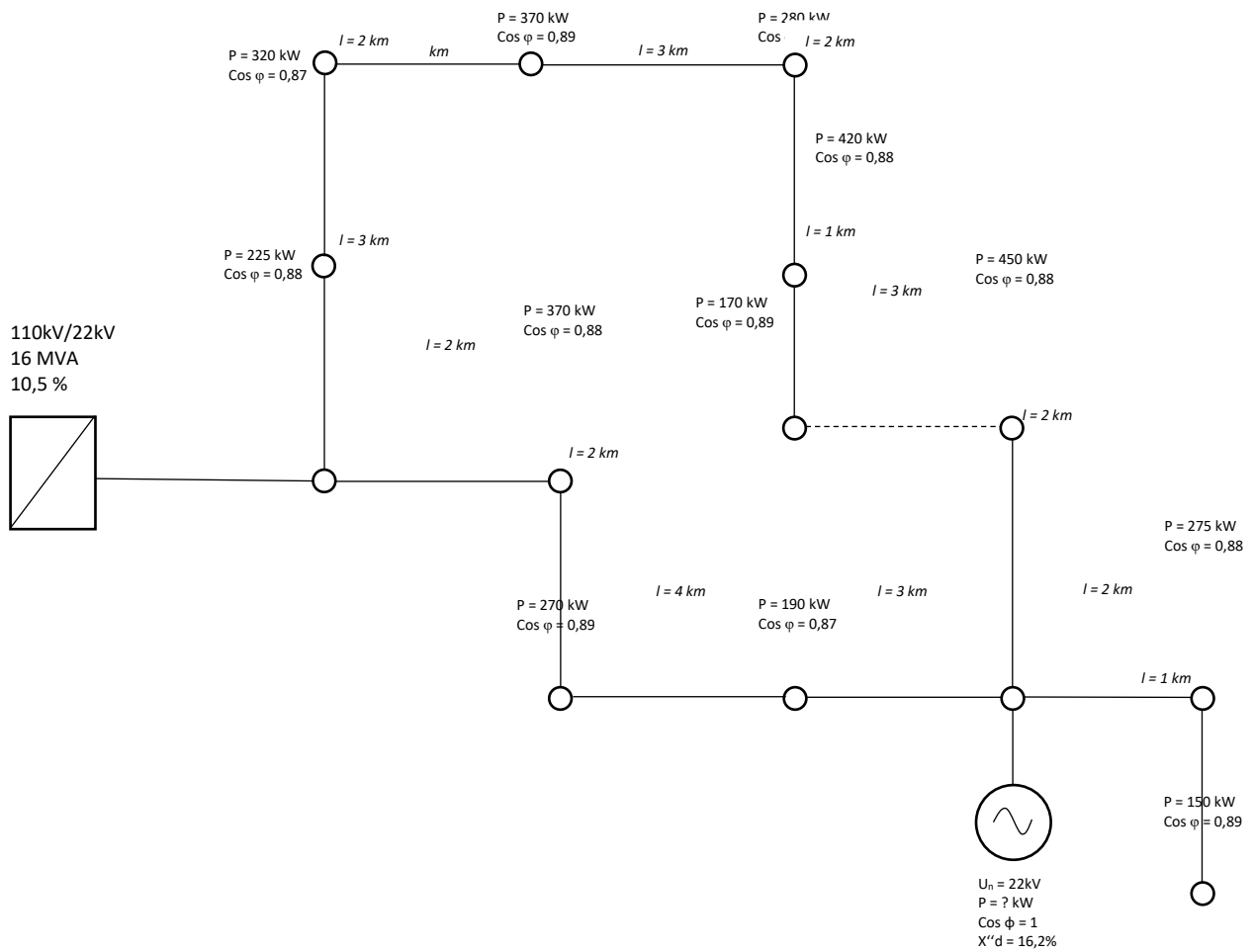


Základní konfigurace sítě pro variantu 4B. Limitní výkon synchronního generátoru je 2,2 MW.

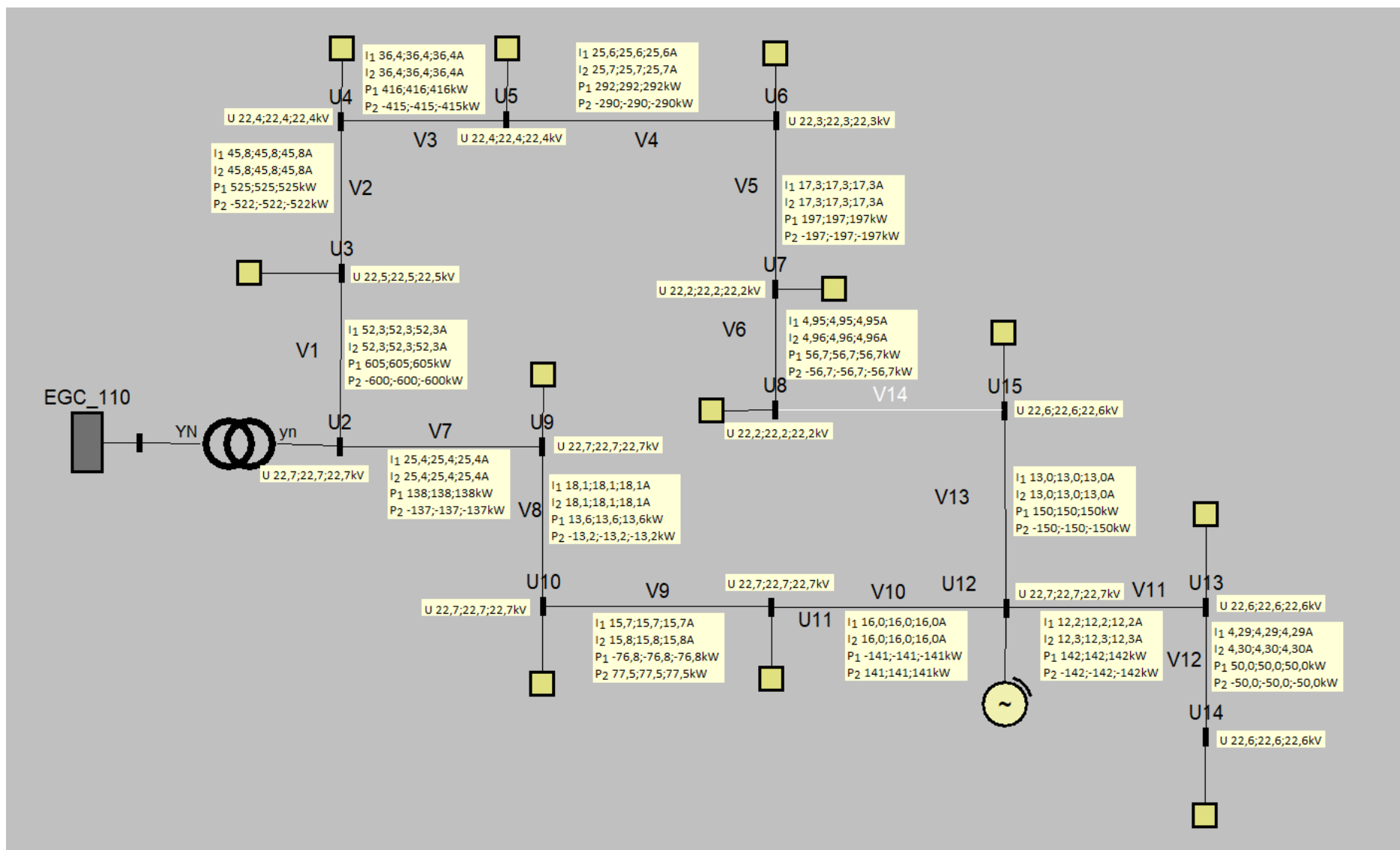


Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 50AlFe6

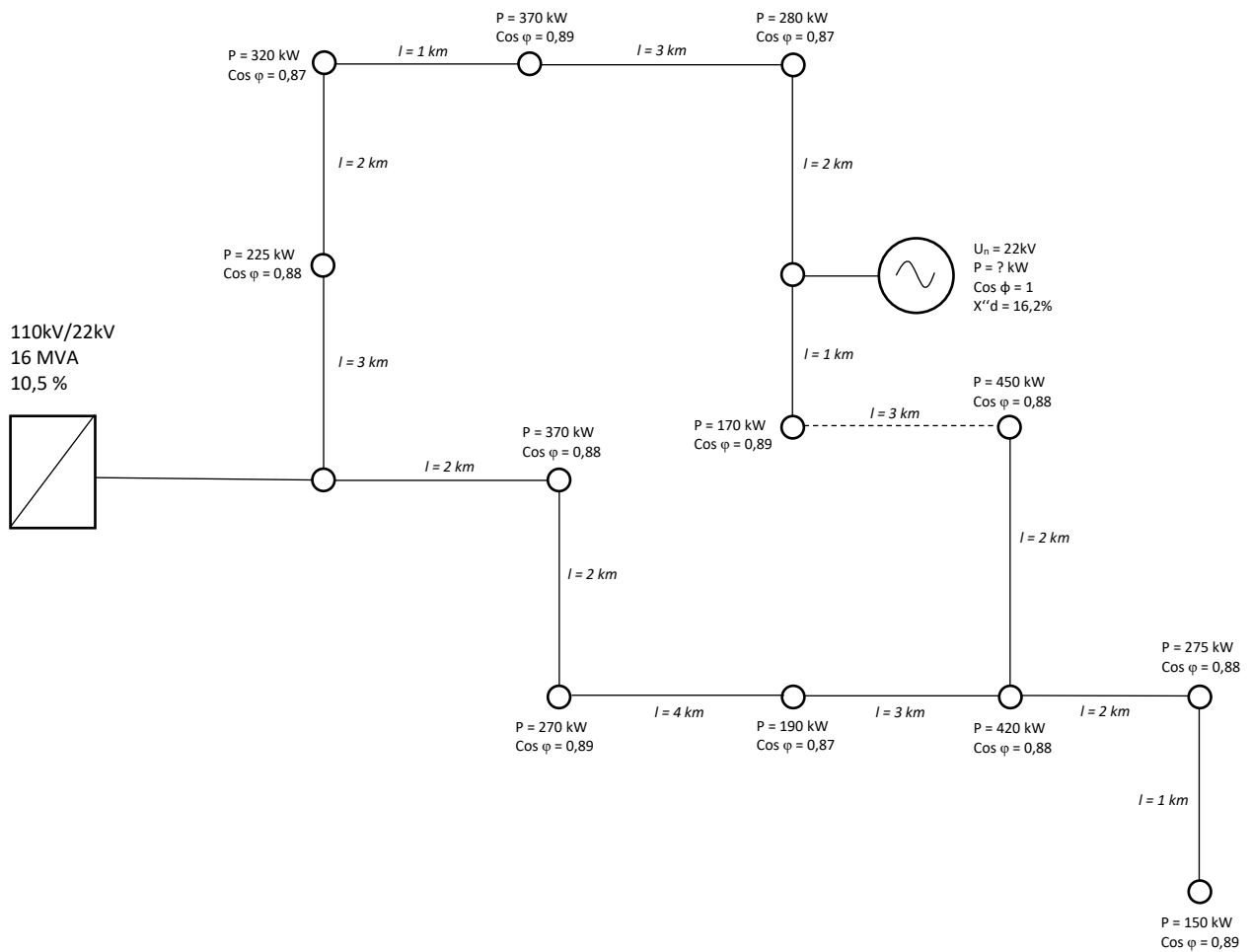


Základní konfigurace sítě pro variantu 1C. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,3 MW.

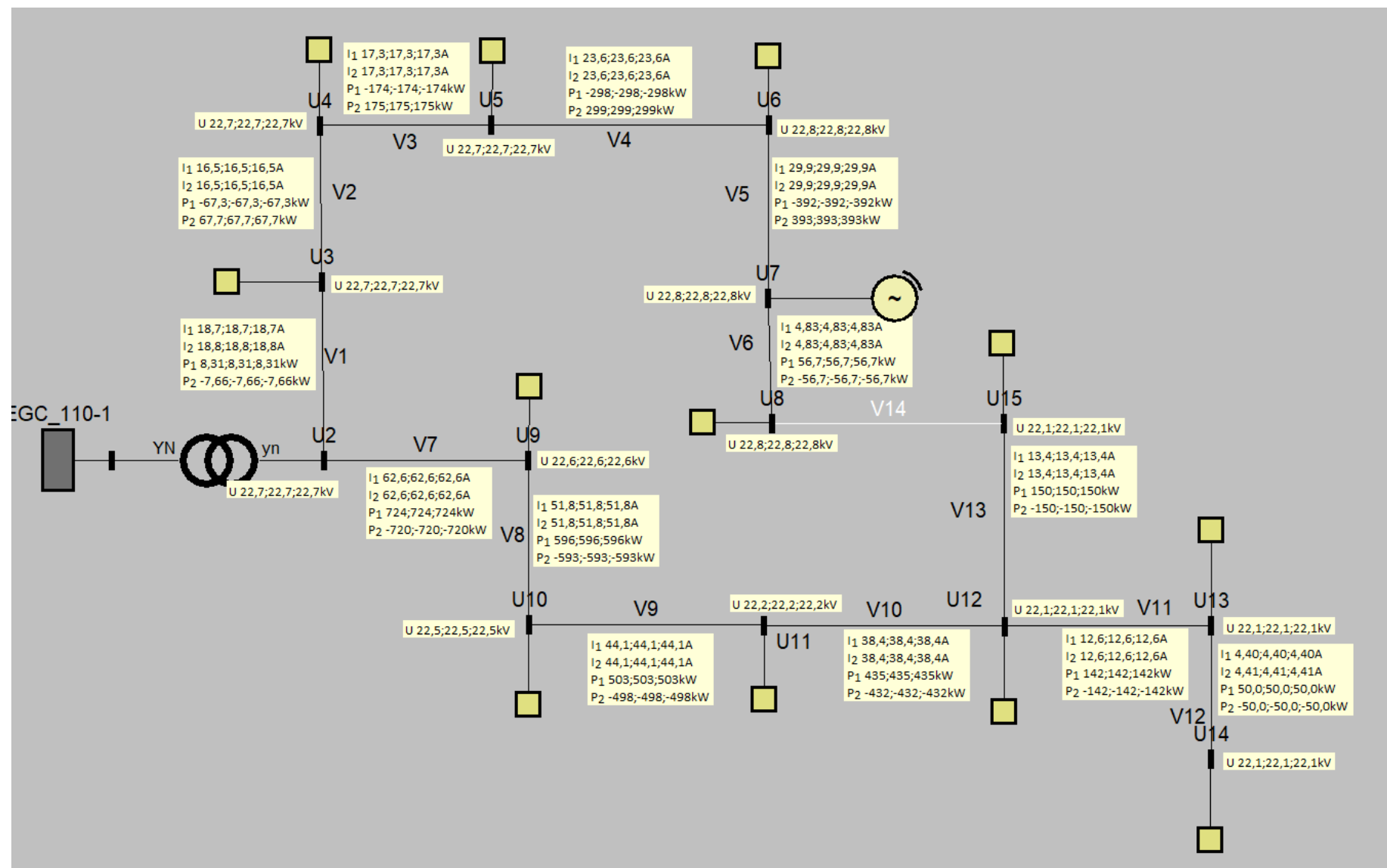


Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 50AlFe6

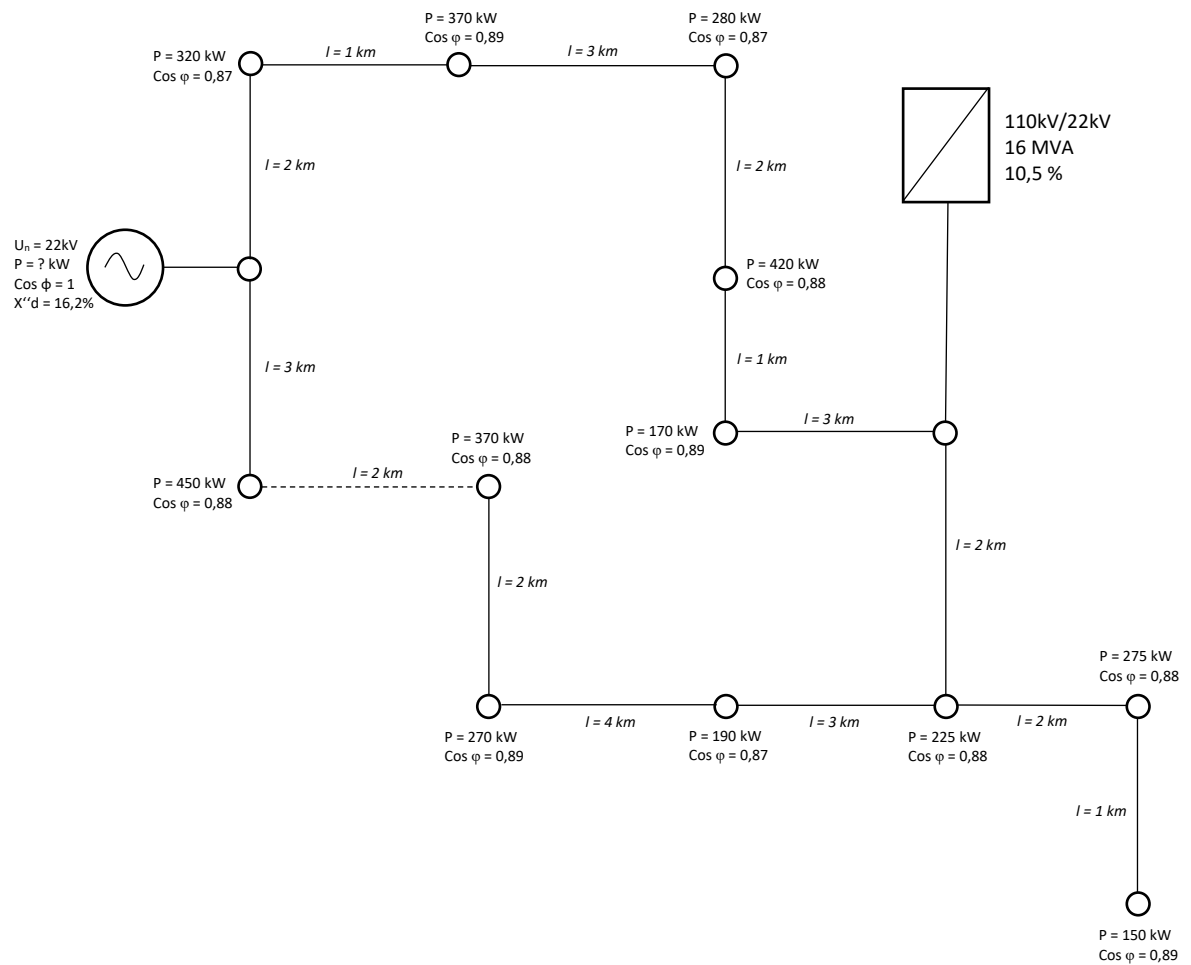


Základní konfigurace sítě pro variantu 2C. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,35 MW.

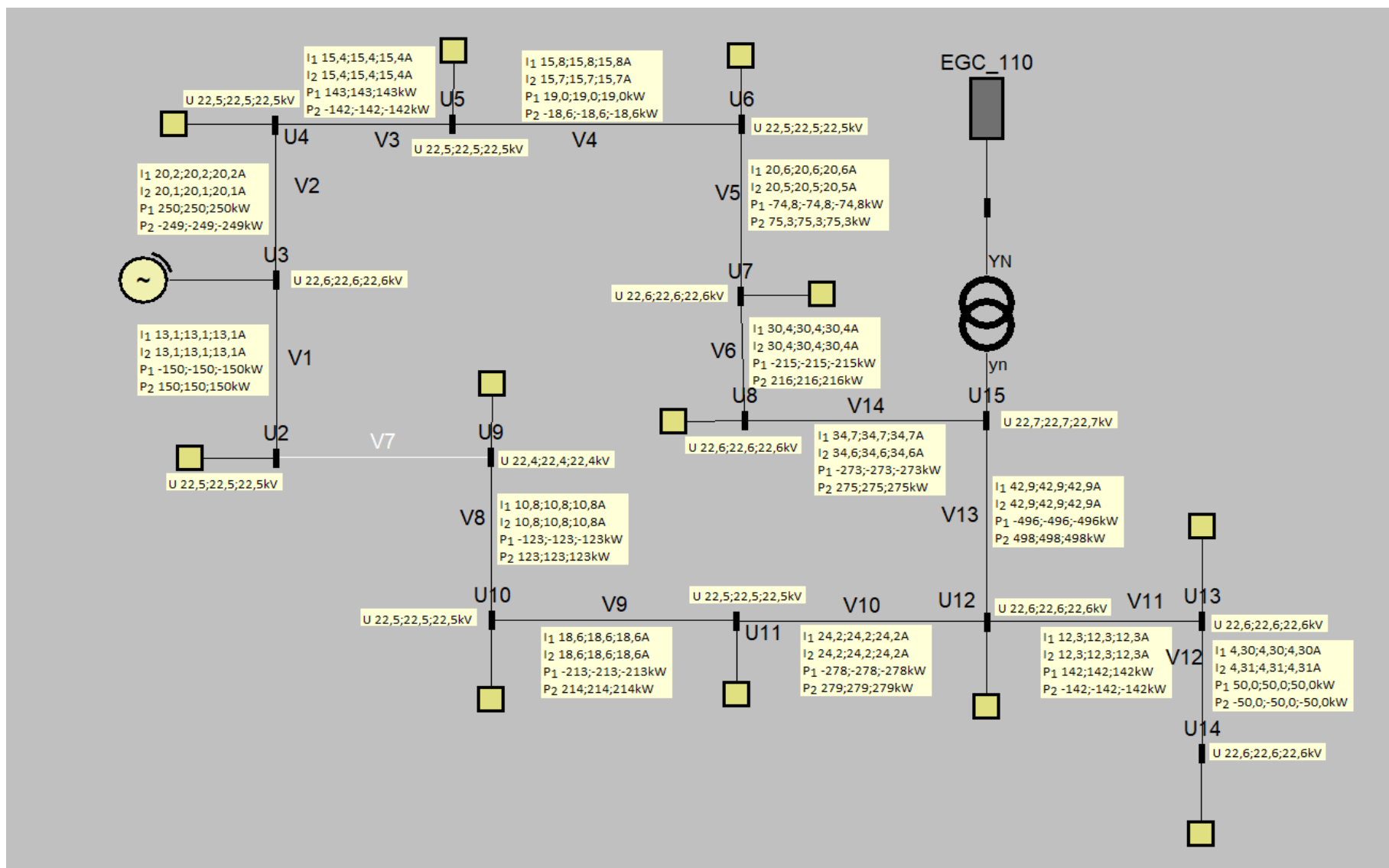


Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 50AlFe6

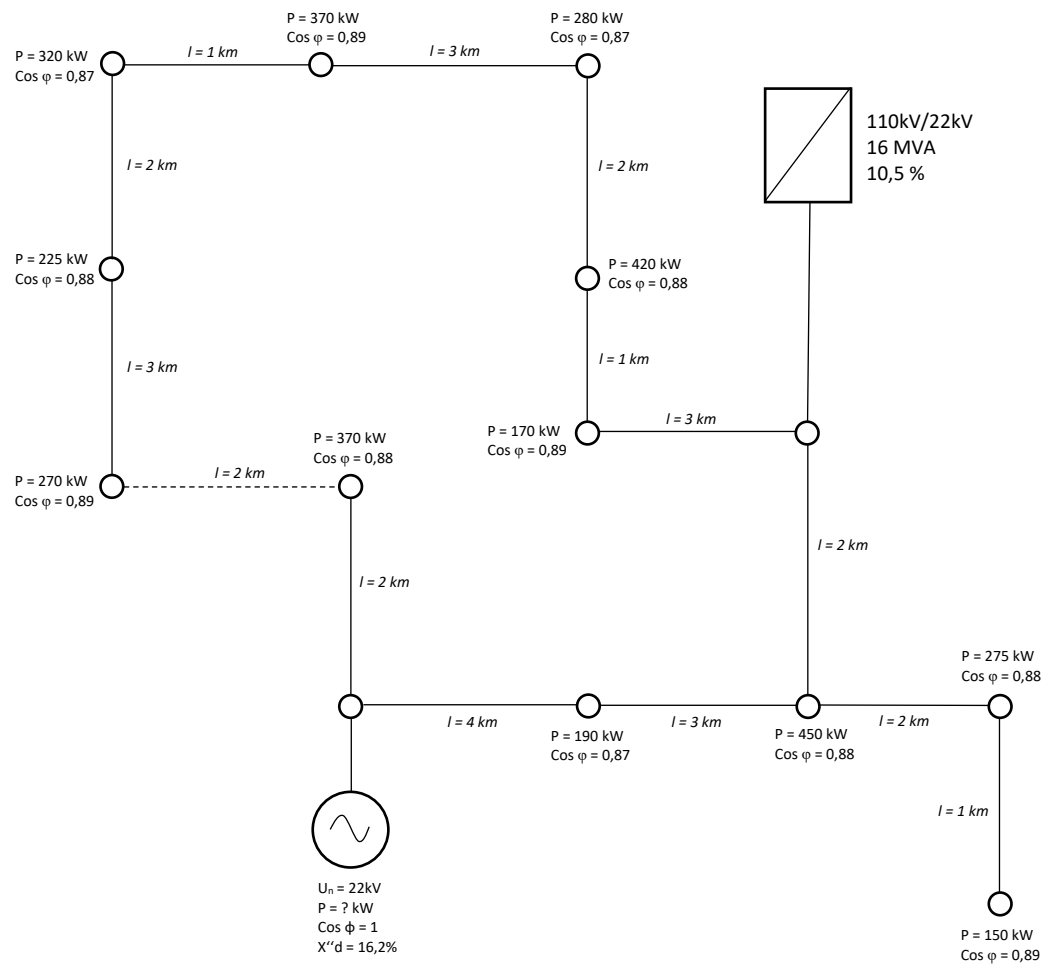


Základní konfigurace sítě pro variantu 3C. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,2 MW.

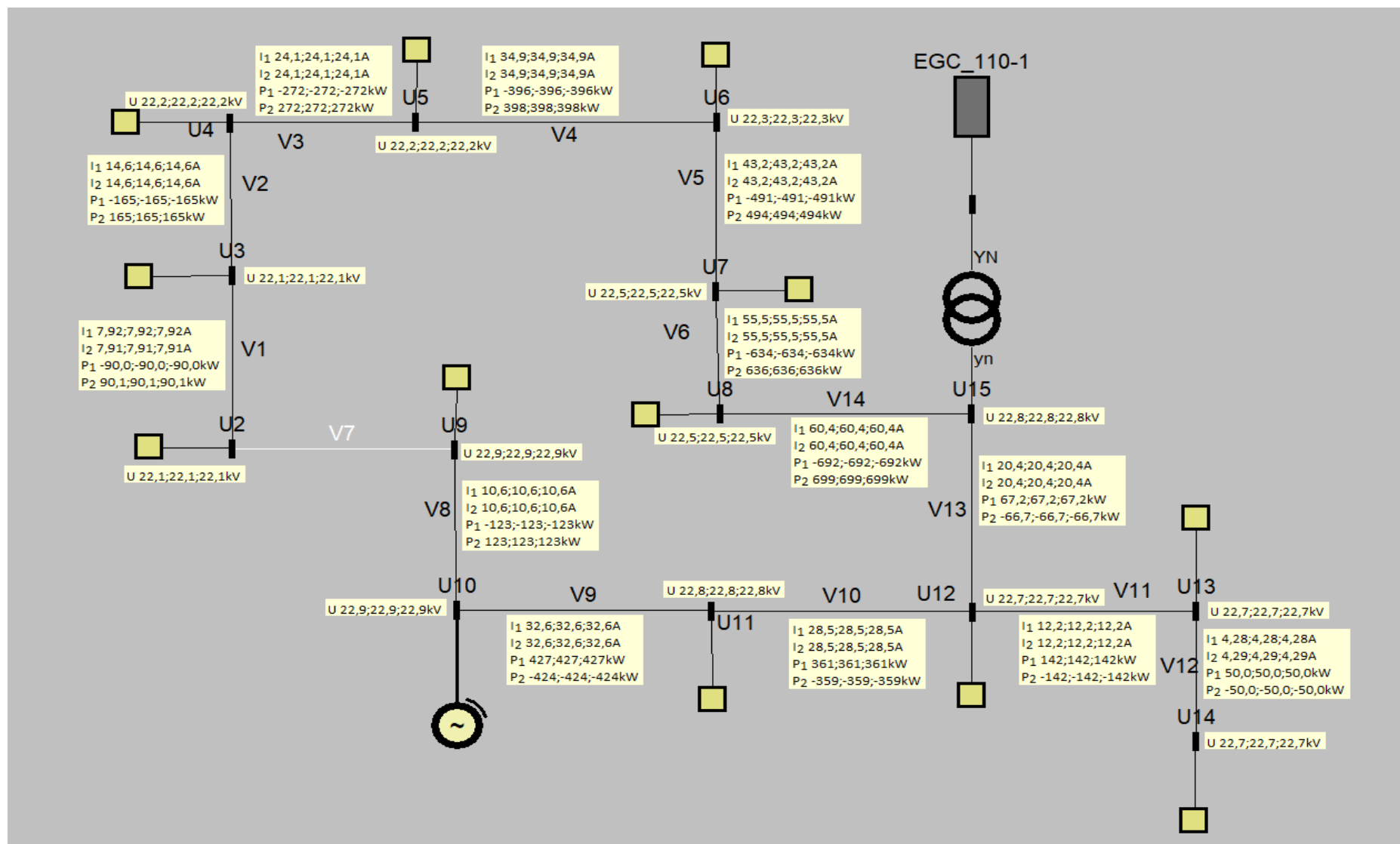


Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 50AlFe6

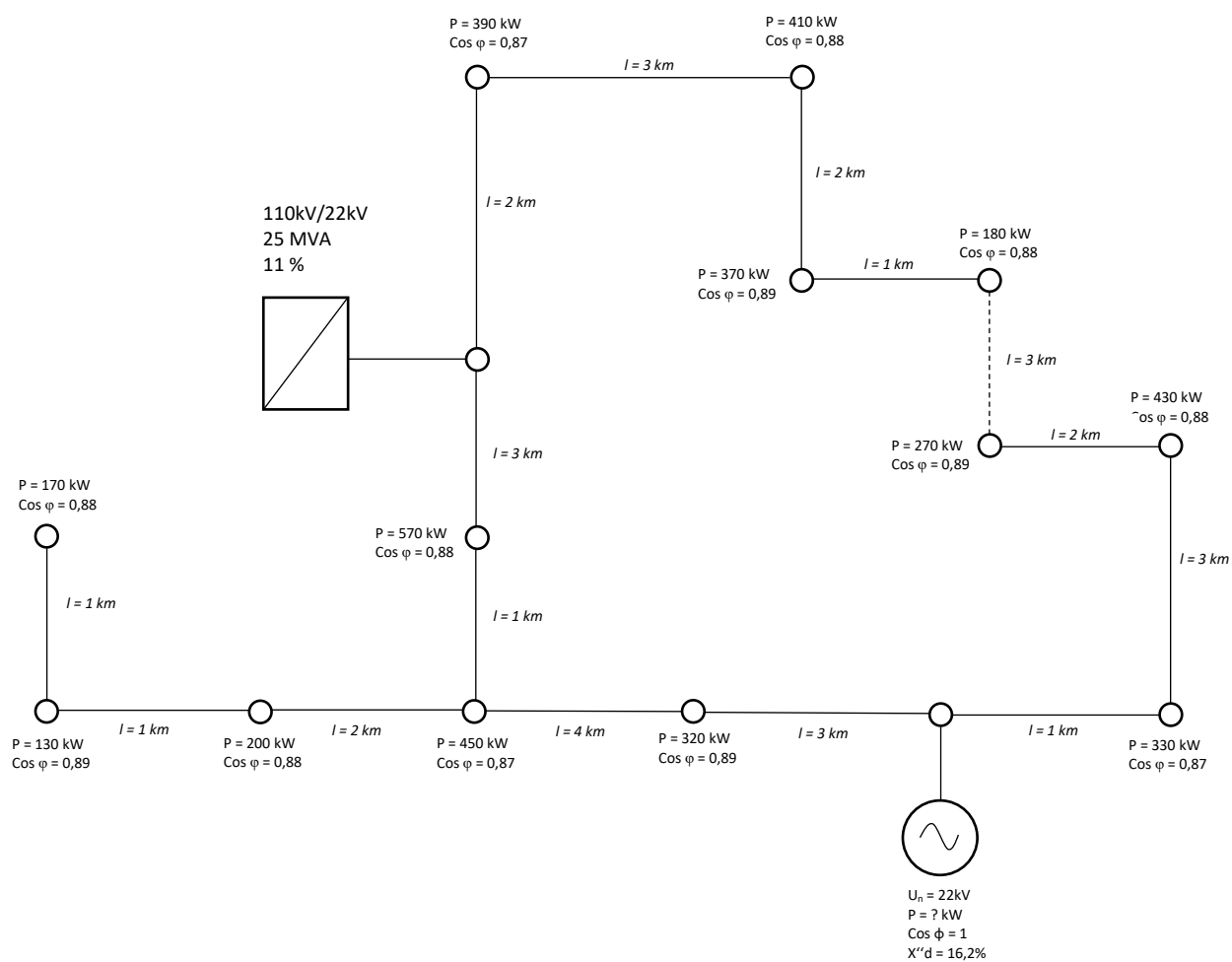


Základní konfigurace sítě pro variantu 4C. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,65 MW.

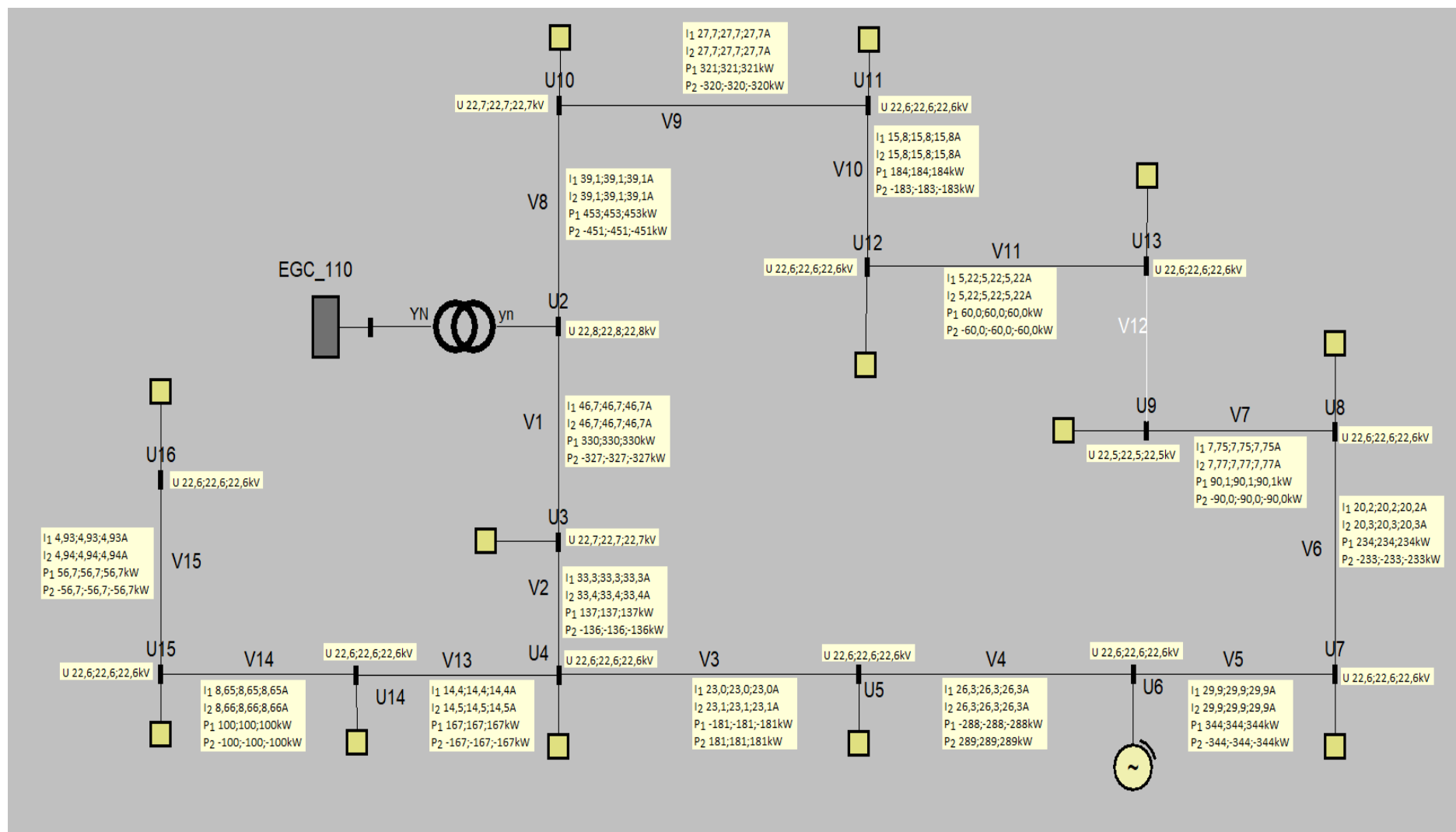


Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 70AlFe6

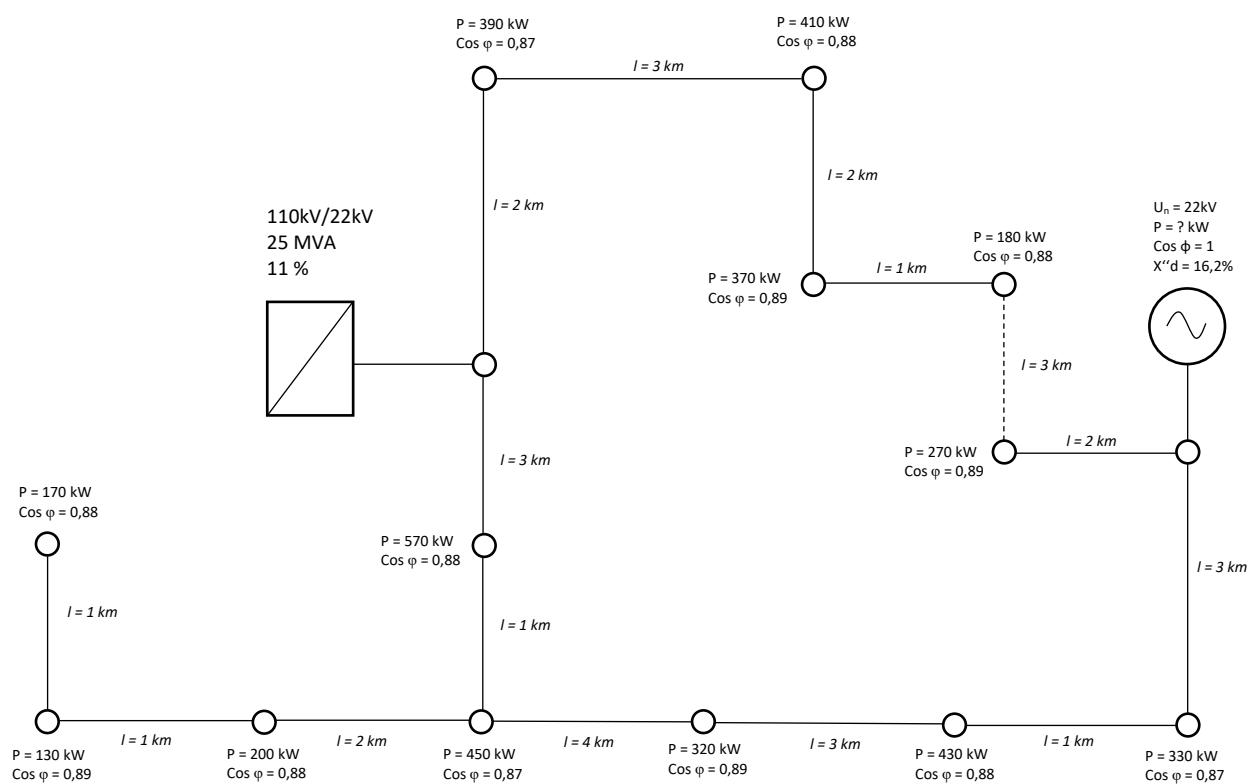


Základní konfigurace sítě pro variantu 1D. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,9 MW.

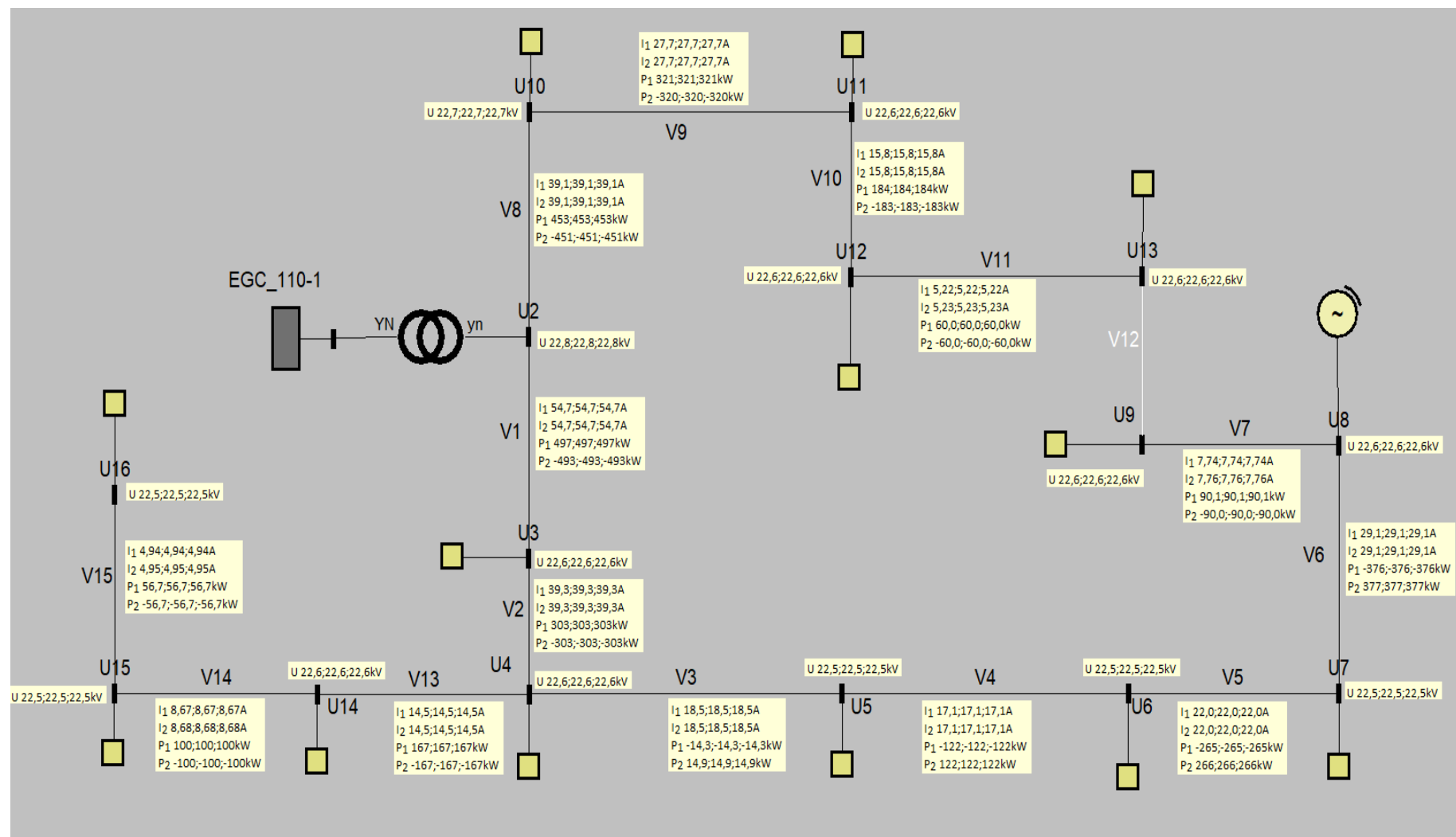


Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 70AlFe6

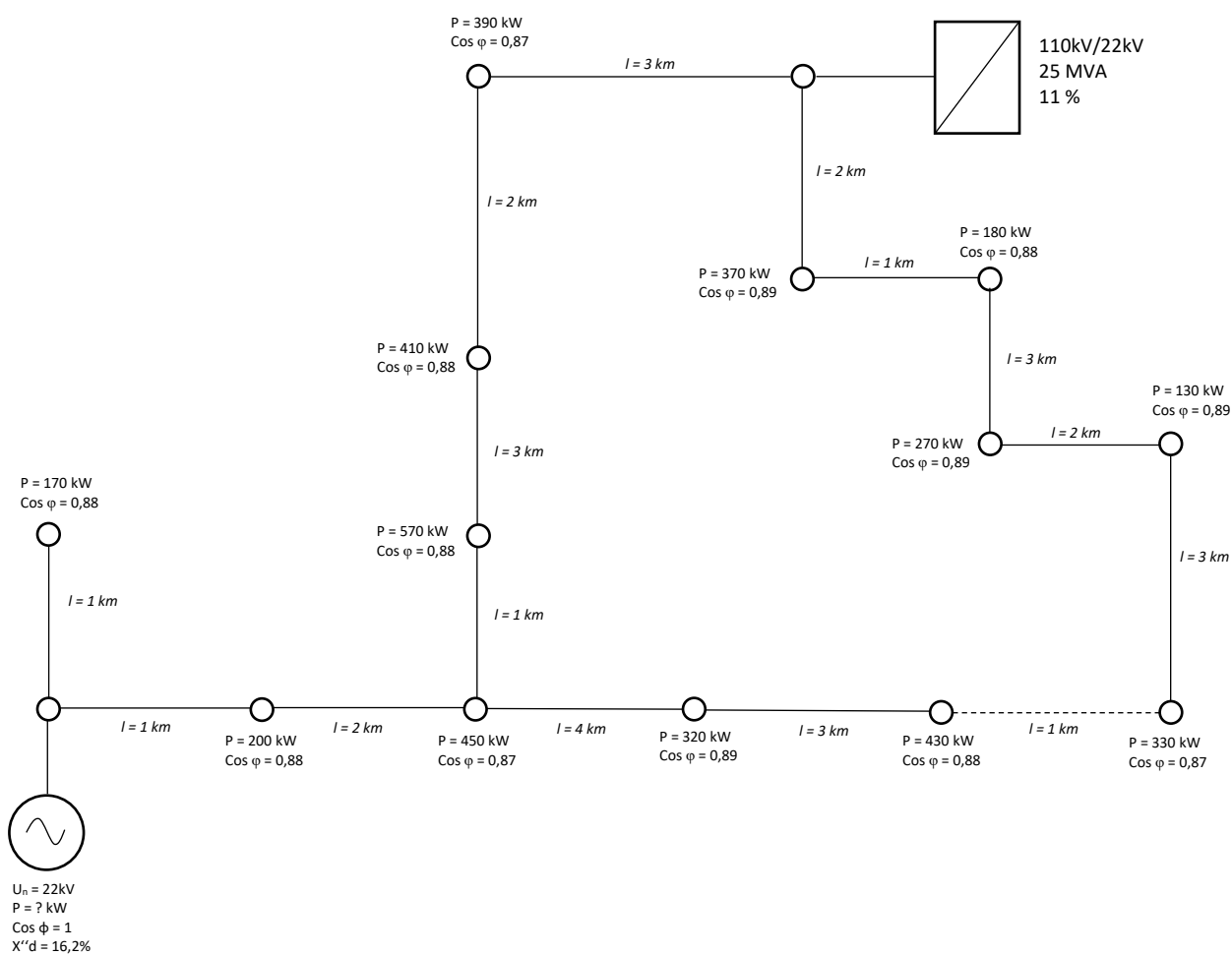


Základní konfigurace sítě pro variantu 2D. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,4 MW.

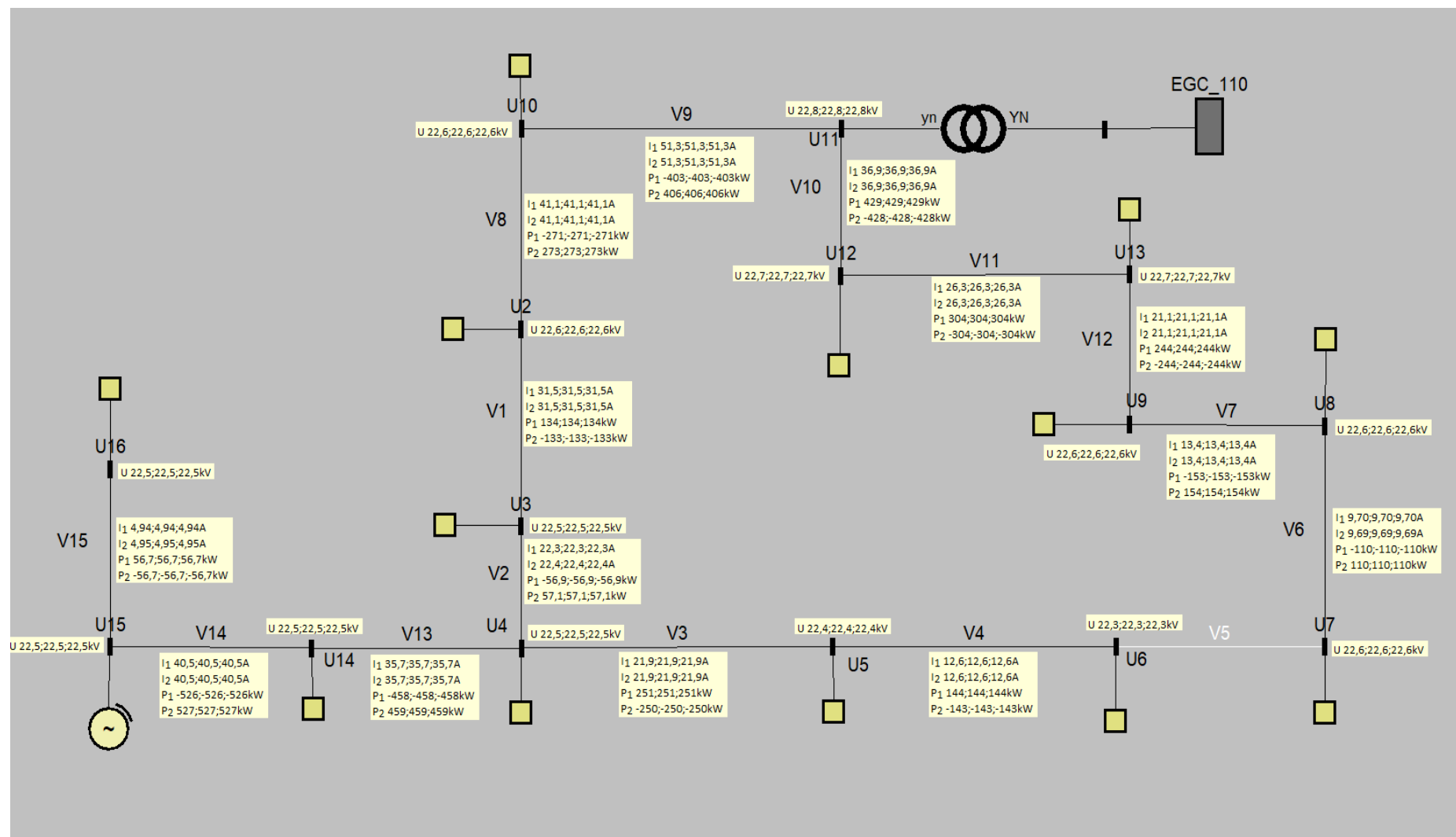


Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 70AlFe6

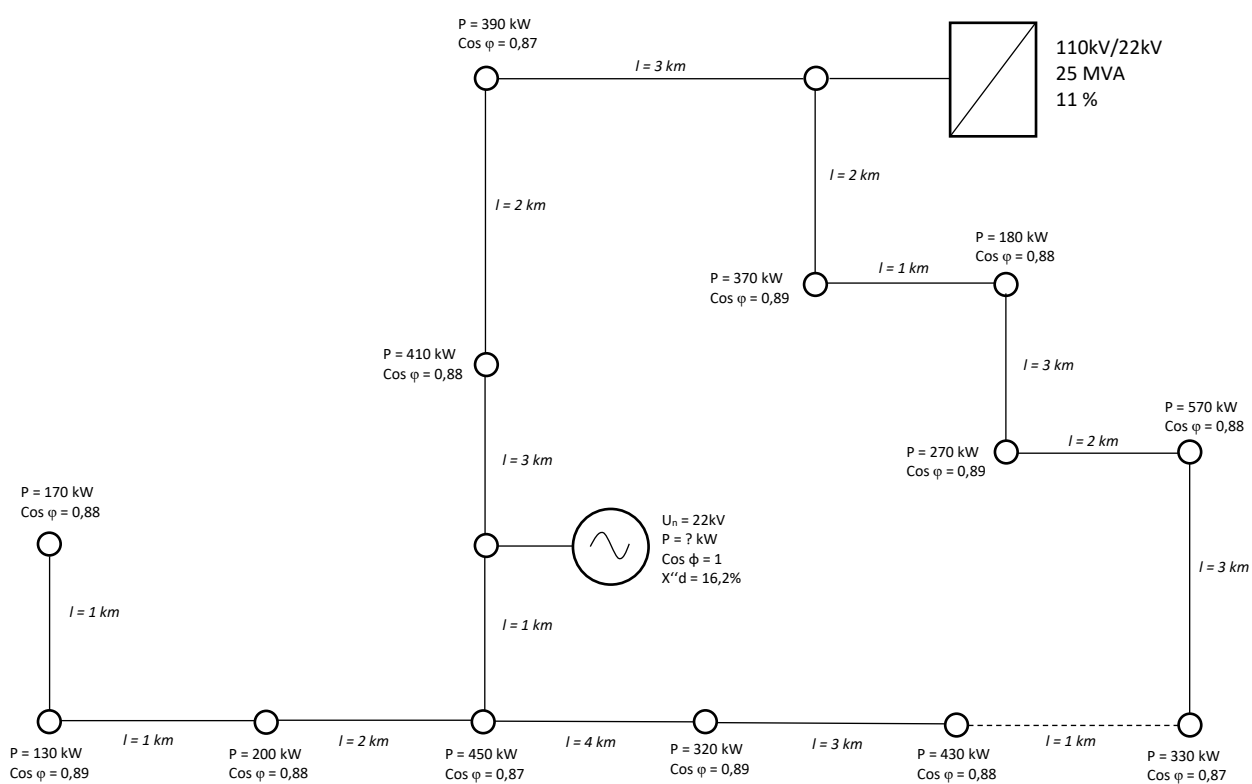


Základní konfigurace sítě pro variantu 3D. Limitní výkon synchronního generátoru je 1,75 MW.

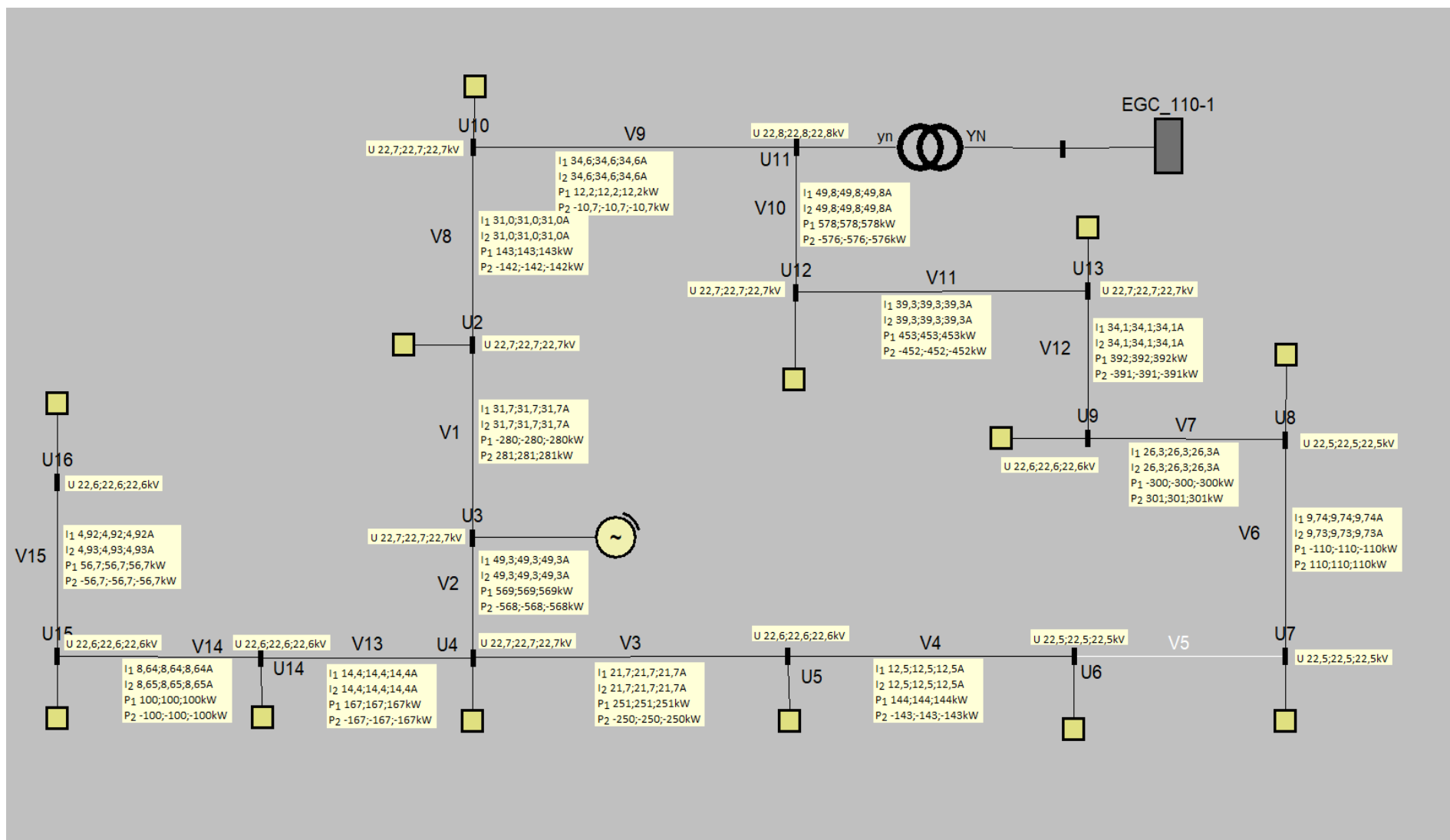


Návrh distribuční sítě

Venkovní vedení: 70AlFe6

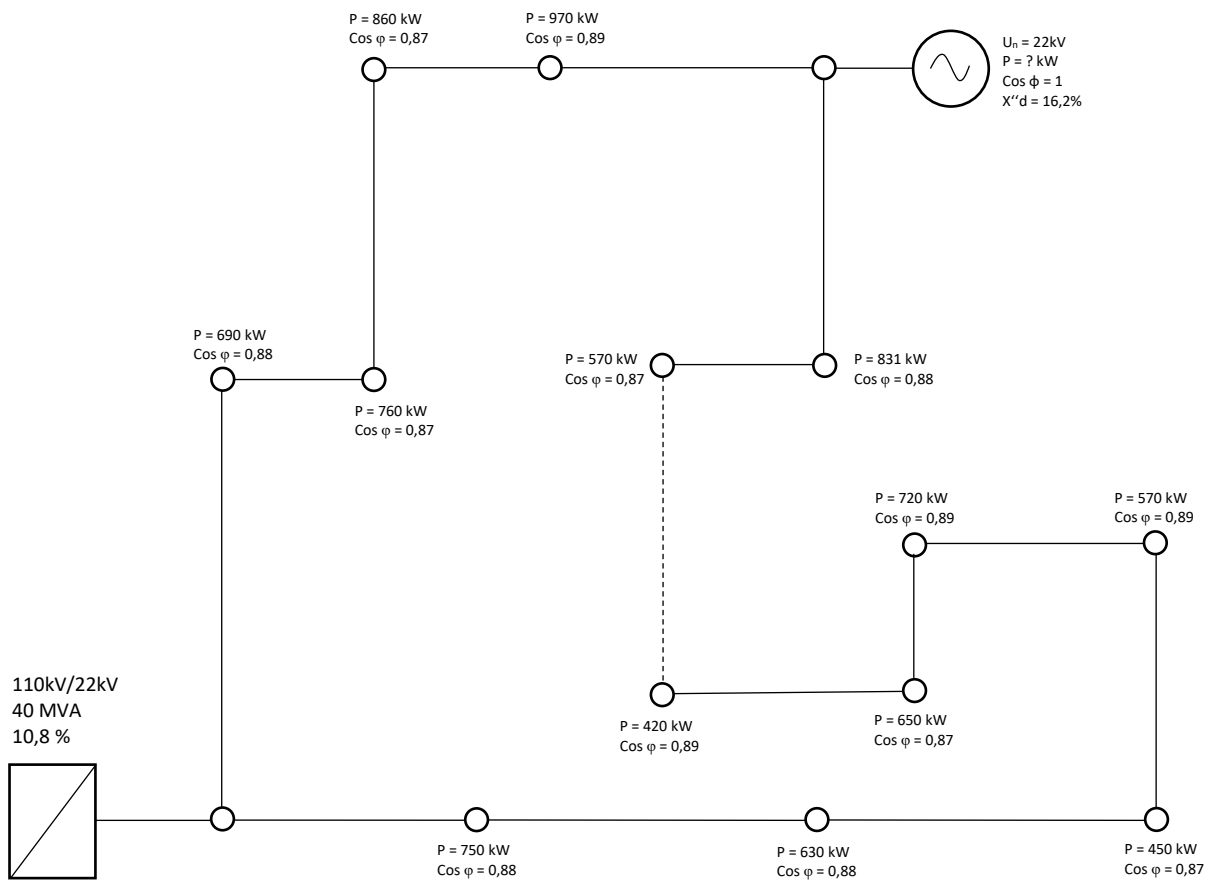


Základní konfigurace sítě pro variantu 4D. Limitní výkon synchronního generátoru je 2,55 MW.

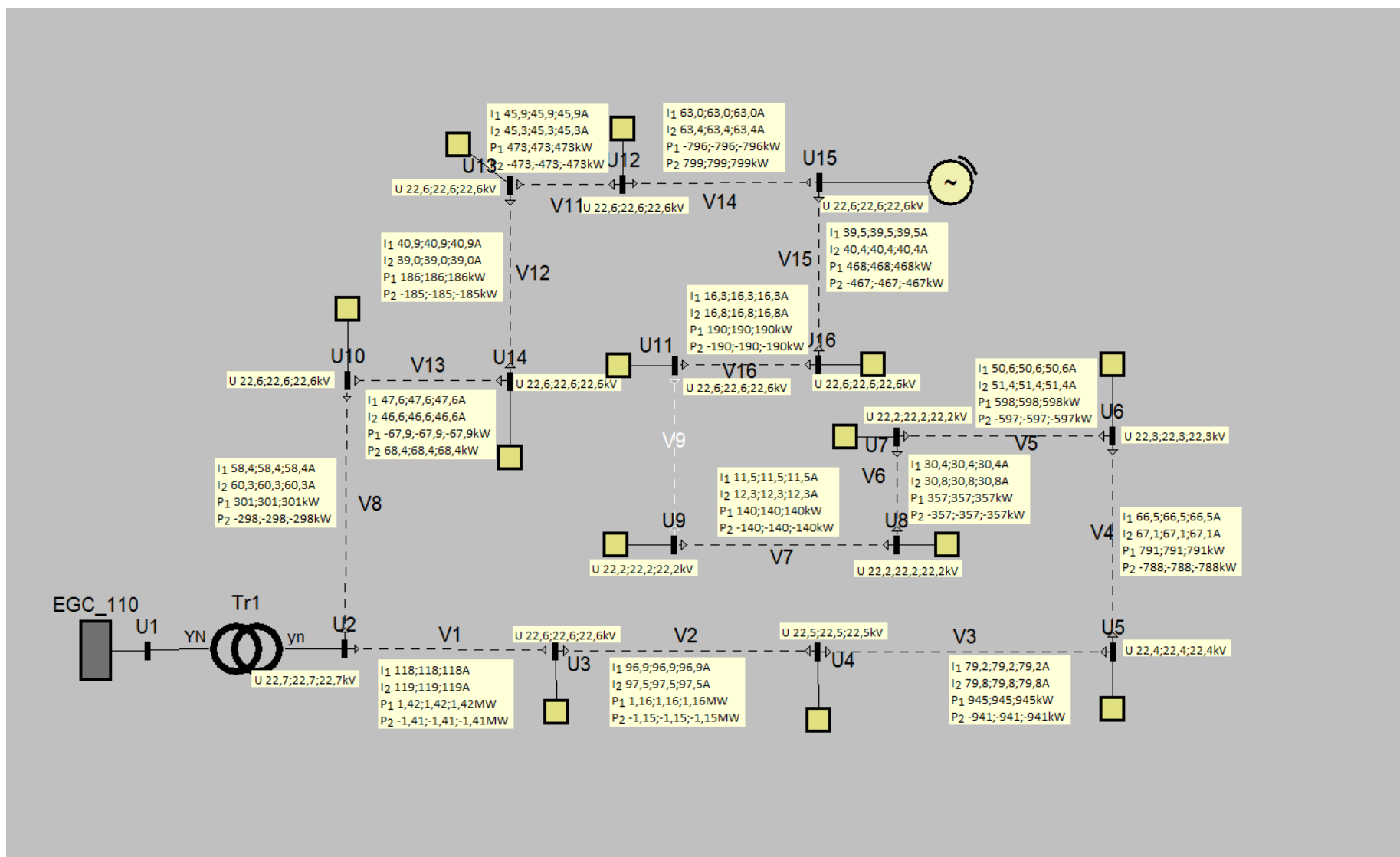


Návrh distribuční sítě

Kabelové vedení: 150AXEKCY

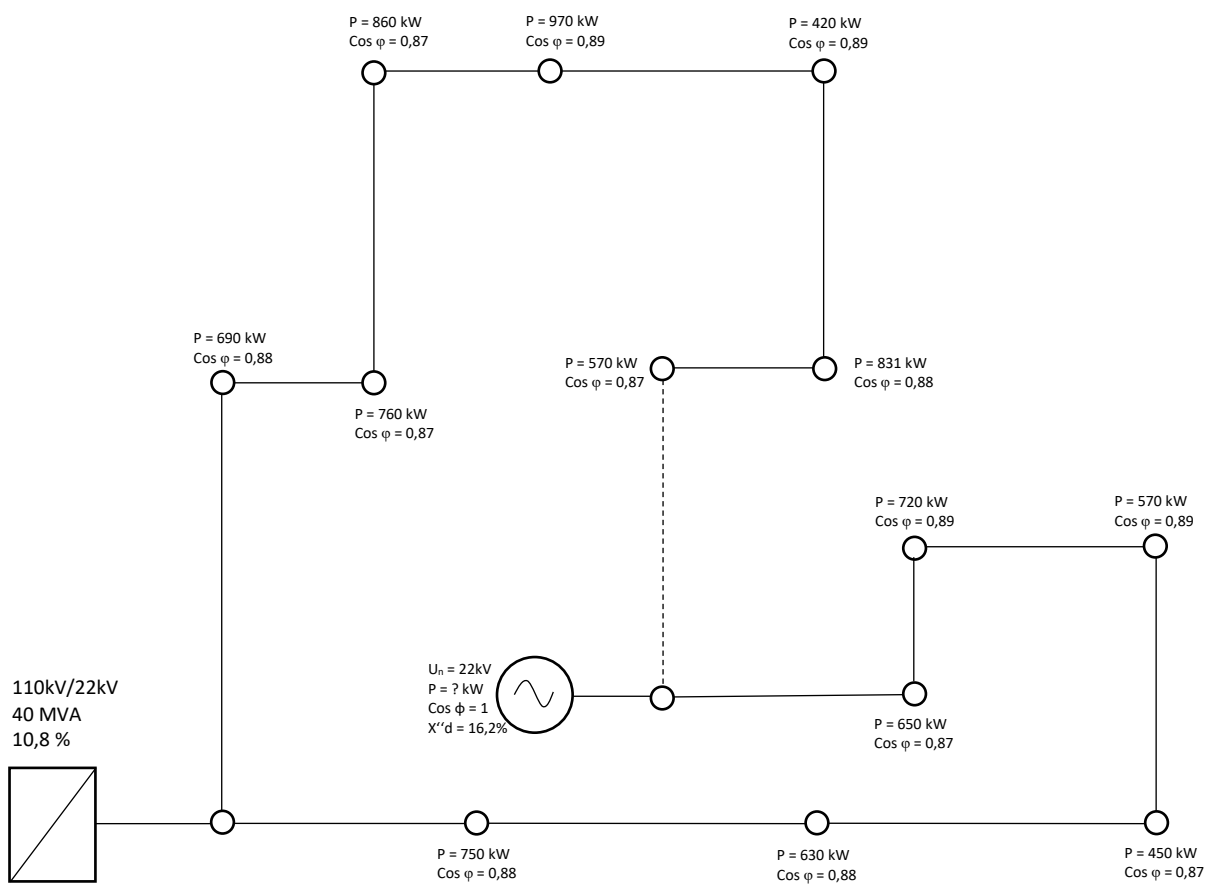


Základní konfigurace sítě pro variantu 1E. Limitní výkon synchronního generátoru je 3,8 MW.

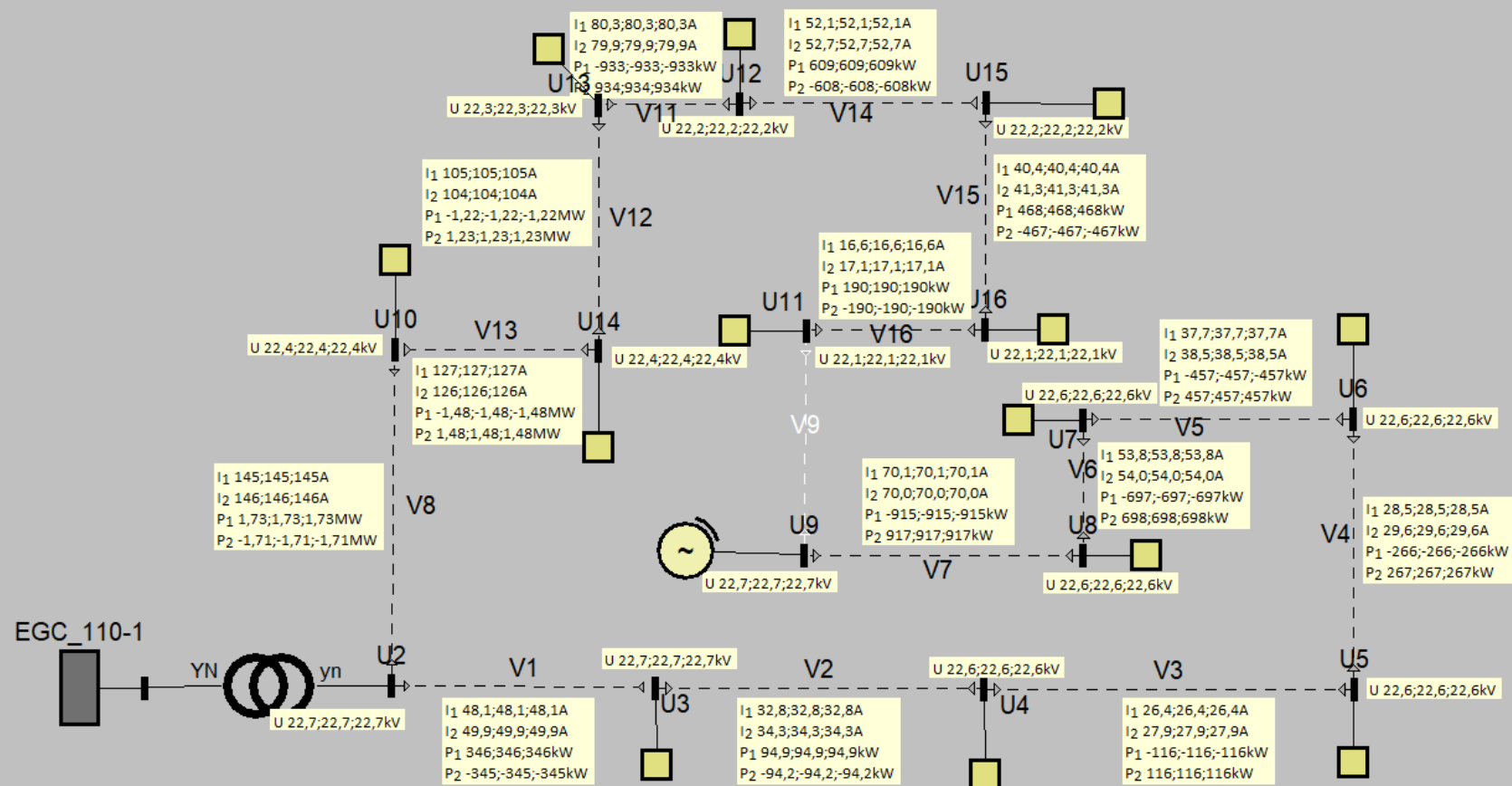


Návrh distribuční sítě

Kabelové vedení: 150AXEKCY

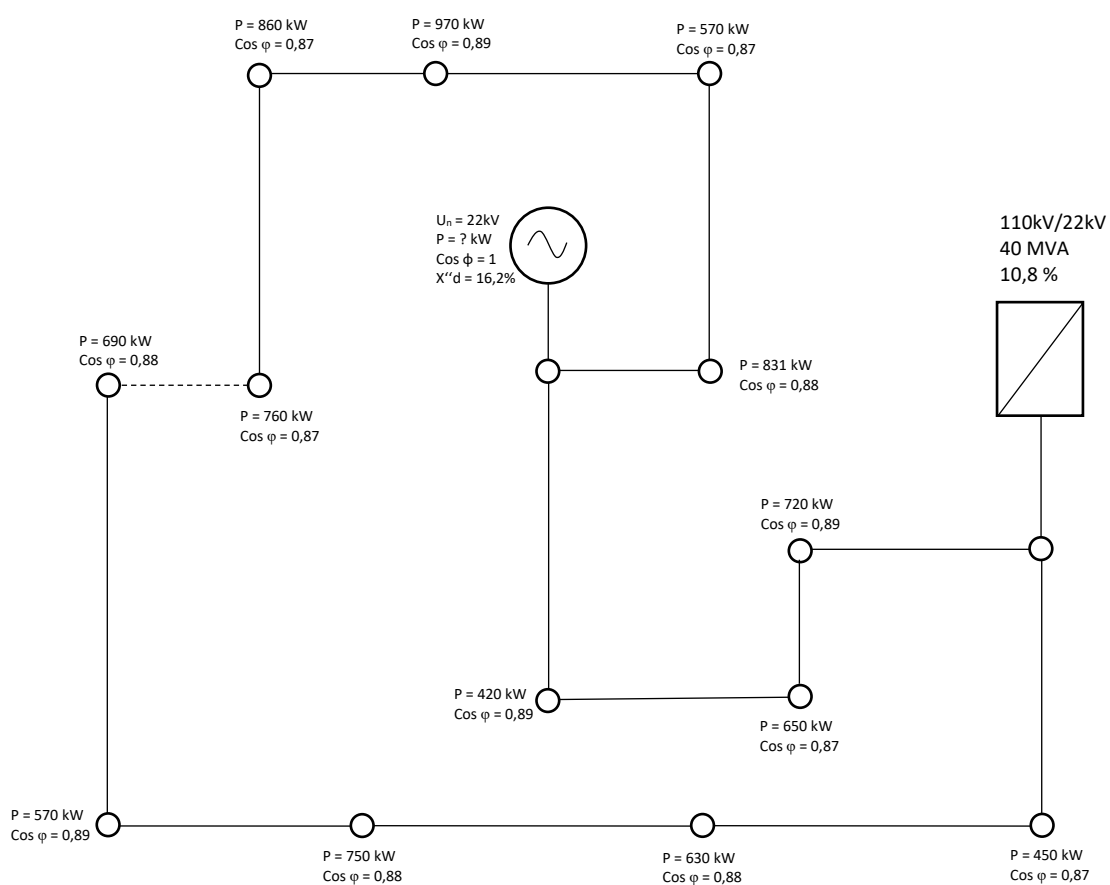


Základní konfigurace sítě pro variantu 2E. Limitní výkon synchronního generátoru je 2,75 MW.

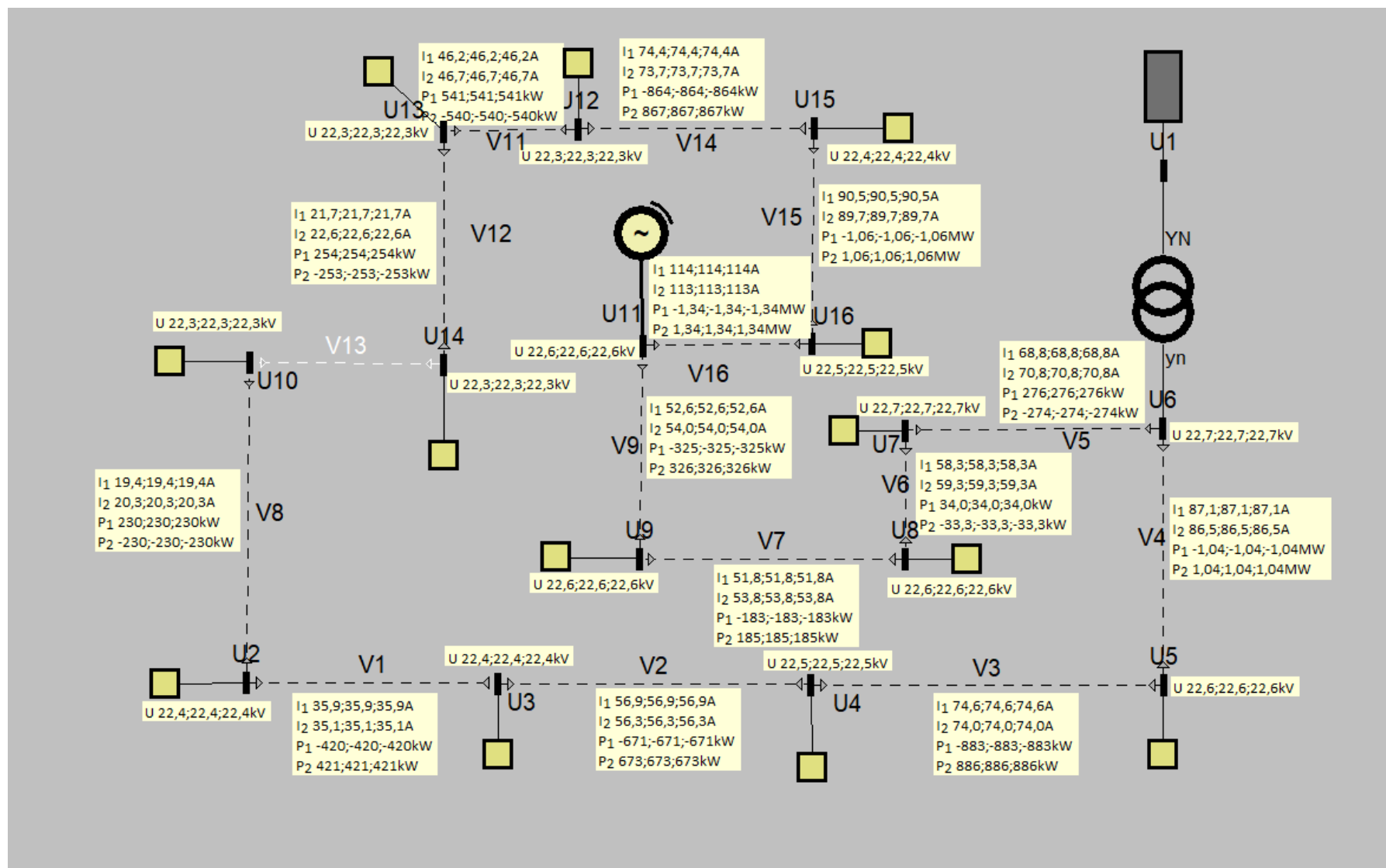


Návrh distribuční sítě

Kabelové vedení: 150AXEKCY

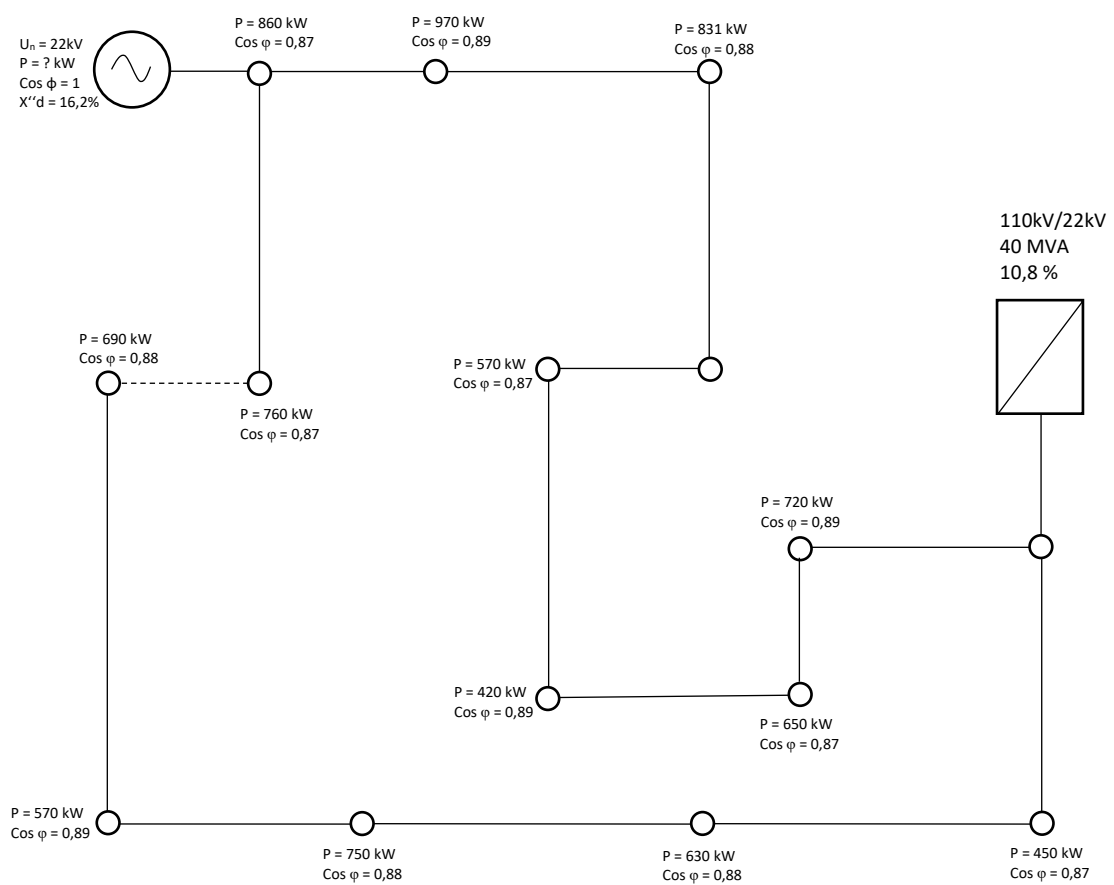


Základní konfigurace sítě pro variantu 3E. Limitní výkon synchronního generátoru je 5 MW.

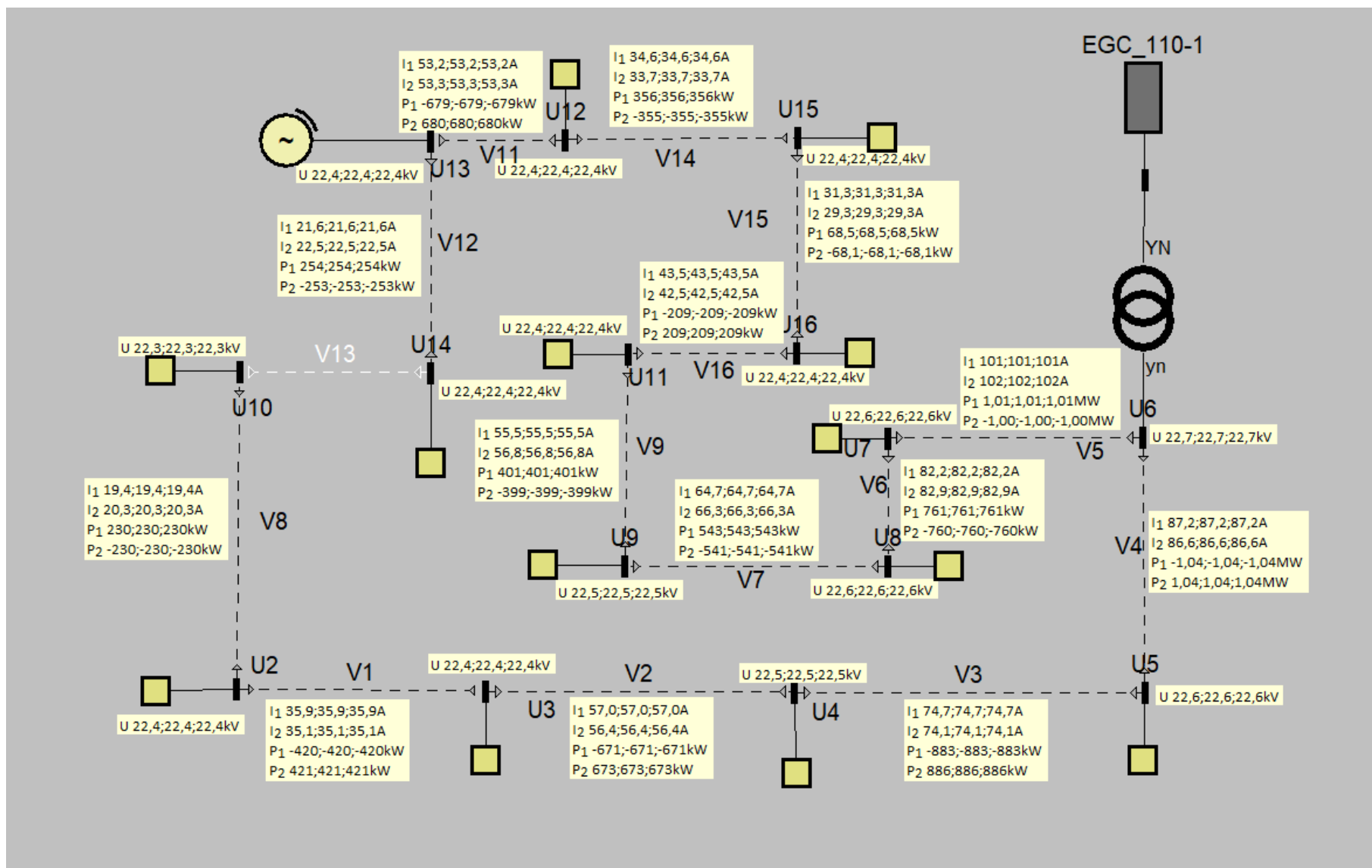


Návrh distribuční sítě

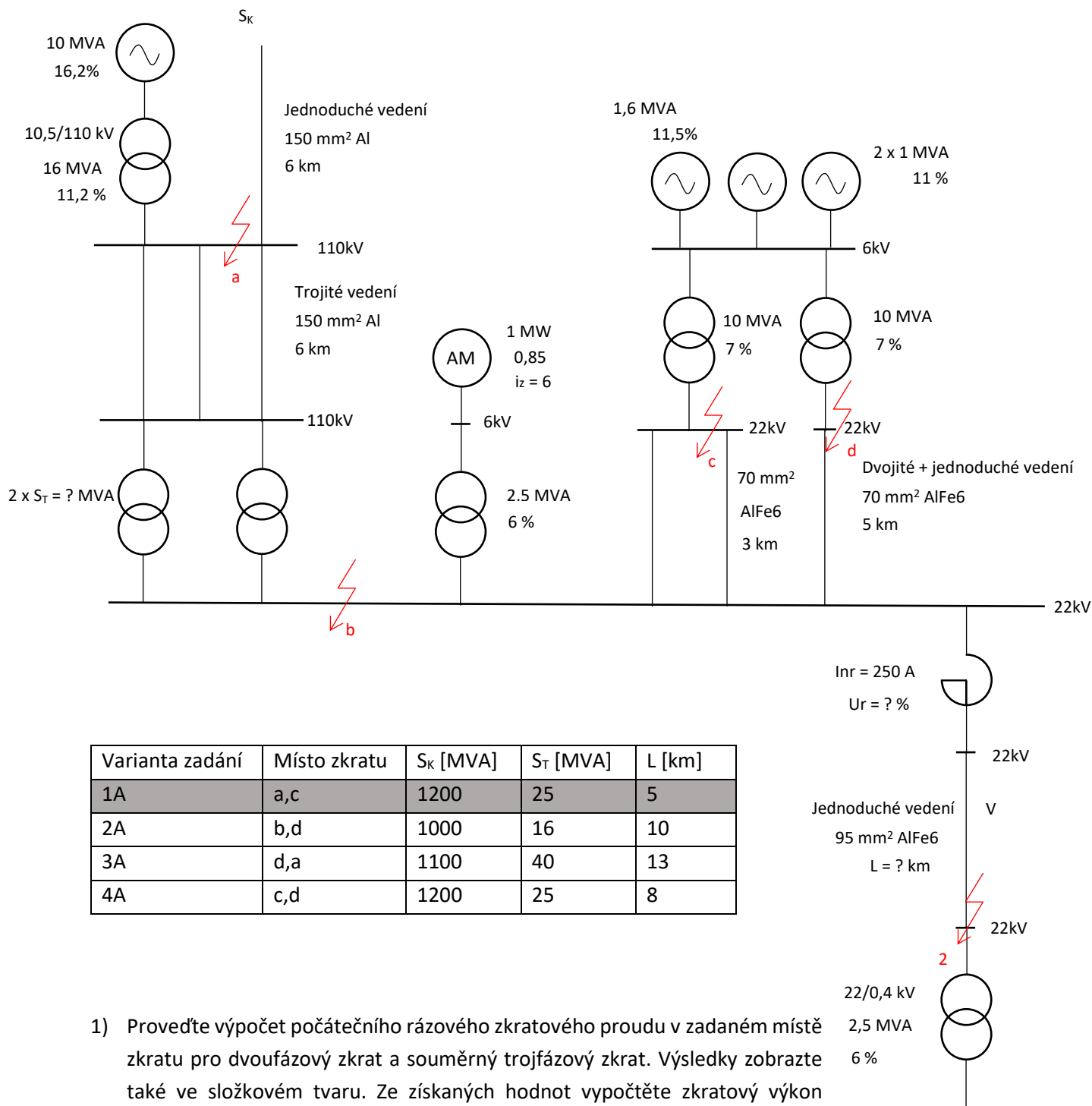
Kabelové vedení: 150AXEKCY



Základní konfigurace sítě pro variantu 4E. Limitní výkon synchronního generátoru je 2,8 MW.

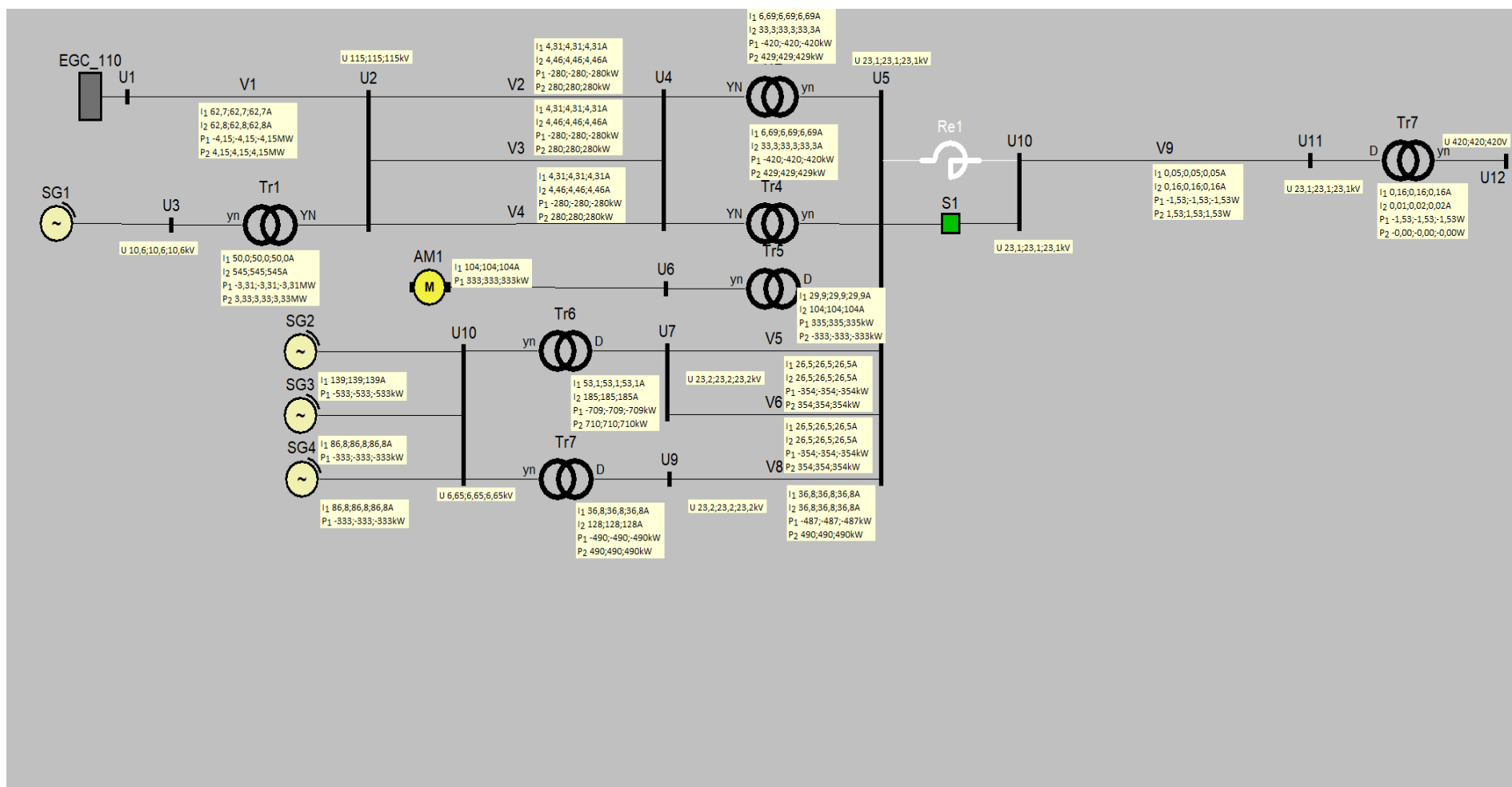


Zkratky v síti

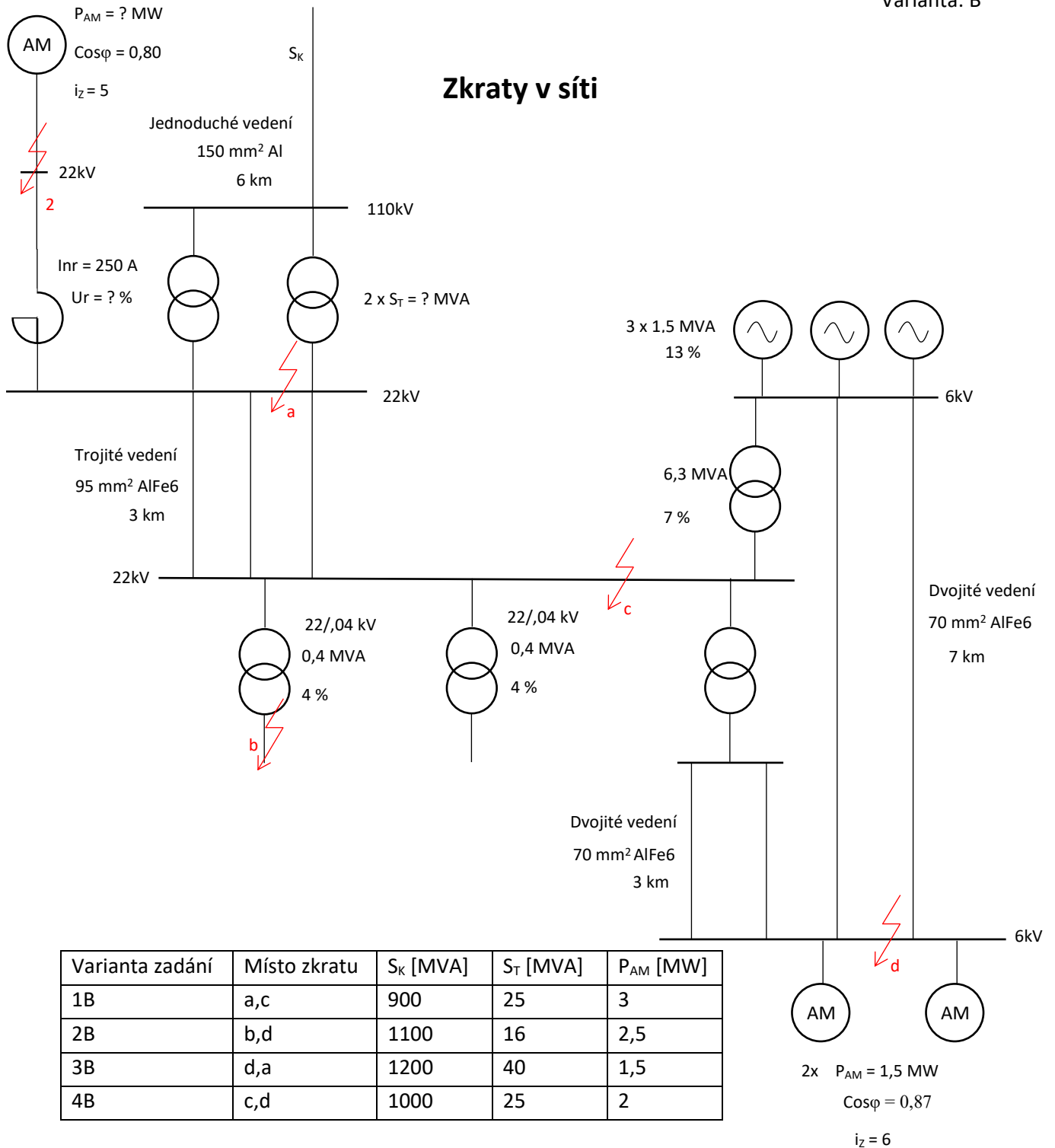


- 1) Provedte výpočet počátečního rázového zkratového proudu v zadaném místě zkratu pro dvoufázový zkrat a souměrný trojfázový zkrat. Výsledky zobrazte také ve složkovém tvaru. Ze získaných hodnot vypočtete zkratový výkon v uzlu.
- 2) V dalším úkolu provedte návrh reaktoru v odbočce k distribučnímu transformátoru tak aby v místě souměrného trojfázového zkratu poklesl zkratový výkon o 30 %.

Základní konfigurace sítě v ustáleném stavu pro variantu A.

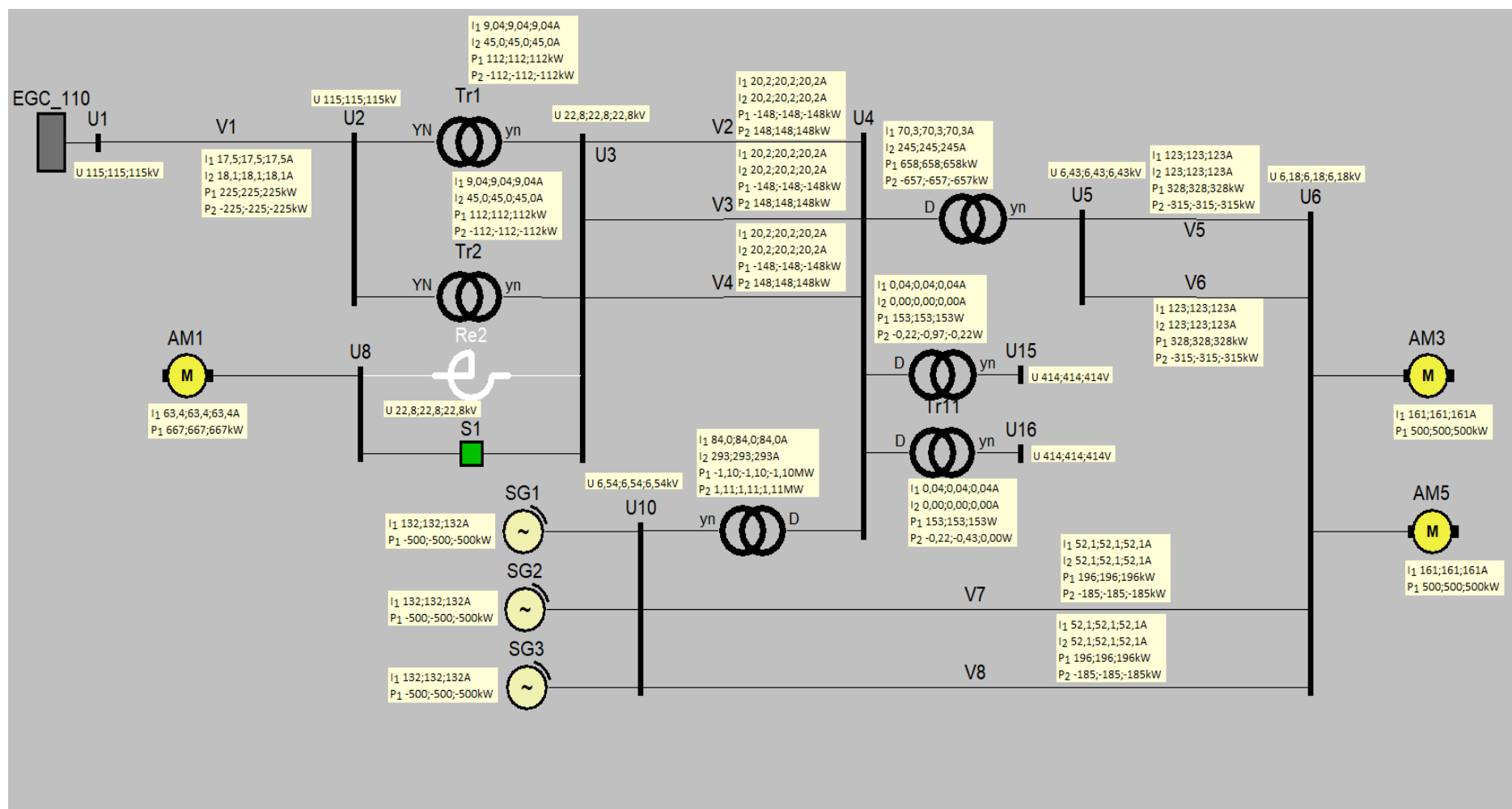


Zkratky v síti

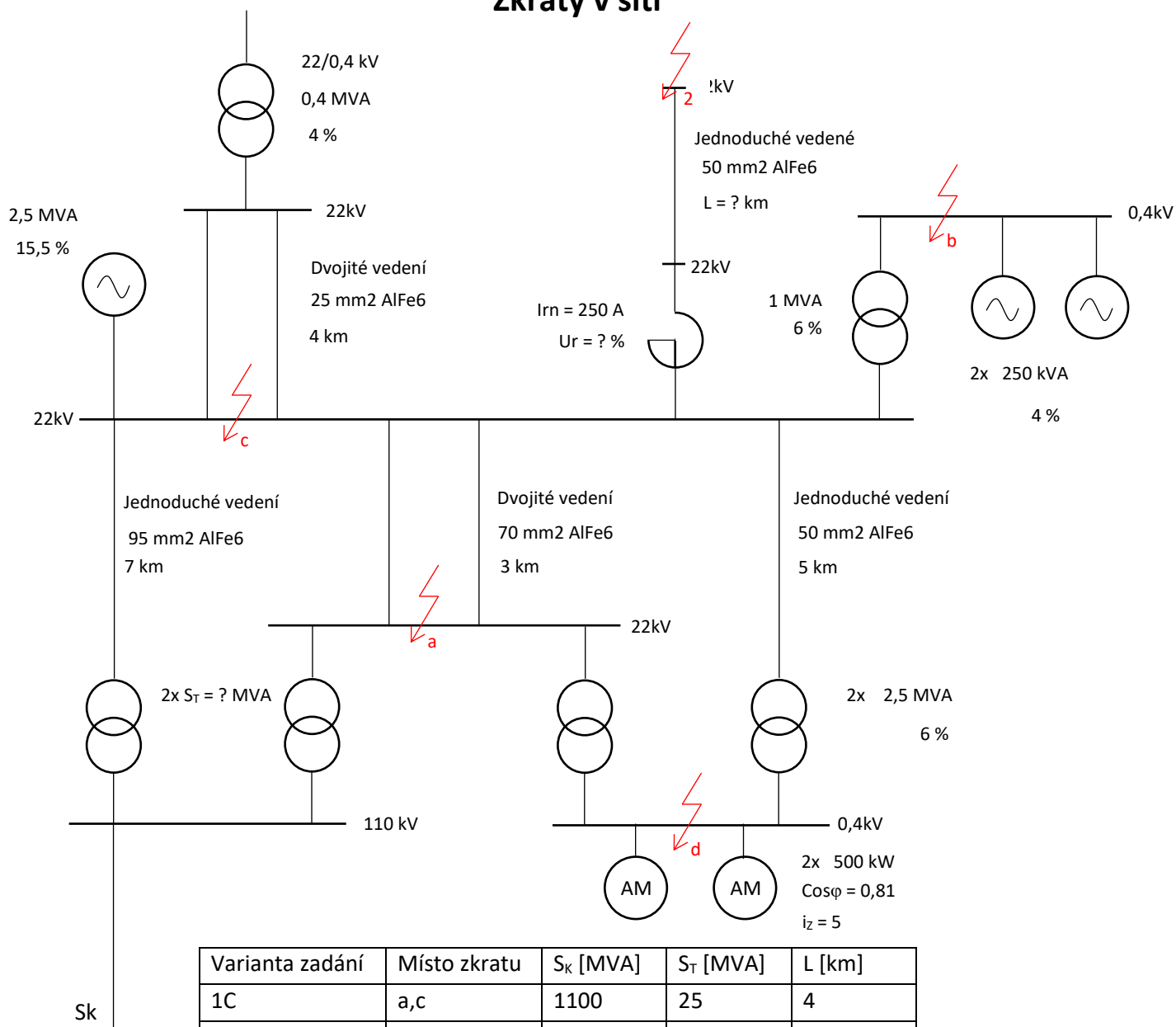


- Provedte výpočet počátečního rázového zkratového proudu v zadaném místě zkratu pro dvoufázový zkrat a souměrný trojfázový zkrat. Výsledky zobrazte také ve složkovém tvaru. Ze získaných hodnot vypočtete zkratový výkon v uzlu.
- V dalším úkolu proveďte návrh reaktoru v odbočce k distribučnímu transformátoru tak aby v místě souměrného trojfázového zkratu poklesl zkratový výkon o 30 %.

Základní konfigurace sítě v ustáleném stavu pro variantu B.



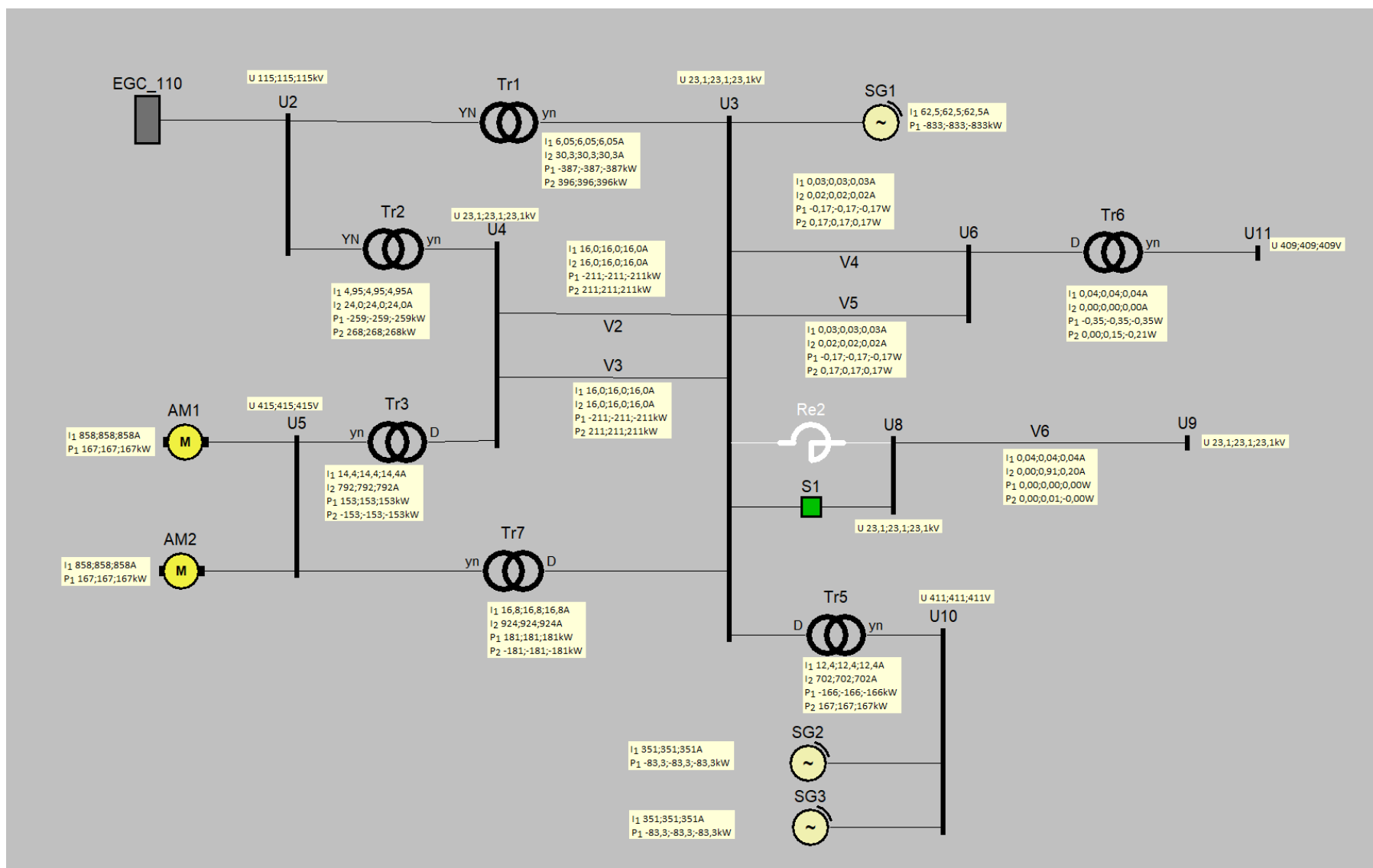
Zkratky v síti



Varianata zadání	Místo zkratu	S_K [MVA]	S_T [MVA]	L [km]
1C	a,c	1100	25	4
2C	b,d	800	16	2
3C	d,a	1300	40	6
4C	c,d	1000	25	5

- Provedte výpočet počátečního rázového zkratového proudu v zadaném místě zkratu pro dvoufázový zkrat a souměrný trojfázový zkrat. Výsledky zobrazte také ve složkovém tvaru. Ze získaných hodnot vypočtete zkratový výkon v uzlu.
- V dalším úkolu provedte návrh reaktoru v odbočce k distribučnímu transformátoru tak aby v místě souměrného trojfázového zkratu poklesl zkratový výkon o 30 %.

Základní konfigurace sítě v ustáleném stavu pro variantu C.



Základní konfigurace sítě v ustáleném stavu pro variantu D.

